

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Pavičević

Zagreb, 2015./2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Matija Pavičević

Zagreb, 2015./2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, profesoru Nevenu Duiću na pruženoj prilici za izradu ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem asistentu Tomislavu Novoselu na stručnim savjetima i pomoći bez koje izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Zahvaljujem se i svojim prijateljima i obitelji, a posebice svojoj dragoj Petri na podršci koju su mi pružali tokom cijelog procesa izrade ovog rada.

Matija Pavičević

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
1. UVOD.....	1
2. CENTRALIZIRANI SUSTAVI I DIZALICE TOPLINE.....	3
2.1. Centralizirani toplinski sustavi.....	3
2.2. Vrelovodni kotlovi za proizvodnju toplinske energije (toplana)	6
2.3. Kogeneracija na biomasu	6
2.4. Dizalica topline	10
2.5. Toplinski spremnik	13
2.5.1. Izolirani spremnici topline s vodom kao radnim medijem	13
2.5.2. Toplinski spremnik u vodnosnom sloju	14
2.5.3. Bušotinski toplinski spremnik.....	16
3. Analiza postojećeg sustava	18
4. MATEMATIČKI MODEL.....	21
4.1. Funkcija cilja.....	21
4.2. Ograničenje vezano na količinu energije na ulazu u spremnik.....	22
4.3. Ograničenja vezana na stupanj djelovanja vrelovodnog kotla.....	23
4.4. Ograničenja vezana za toplinski spremnik.....	24
4.5. Ograničenje vezano za dizalicu topline.....	25
4.6. Ostala ograničenja.....	26
5. PRETPOSTAVKE, ULAZNI PODACI I SCENARIJI.....	27
5.1. Pretpostavke i pojednostavljenja.....	27
5.2. Ulazni podaci	28
5.3. Analiza scenarija	31
6. REZULTATI ANALIZE	37
6.1. Scenarij 1 – Referentno stanje	37
6.2. Scenarij 2 – Ugradnja toplinskog spremnika	38
6.3. Scenarij 3 – Ugradnja toplinskog spremnika i dizalice topline	42
6.3.1. Slučaj 1 - Dizalica topline snage 1MW	42
6.3.2. Slučaj 2 - Dizalica topline snage 4,5 MW	51
7. DISKUSIJA	60
8. ZAKLJUČAK.....	63
ZAHVALA.....	64
LITERATURA.....	65
PRILOZI.....	67

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz centraliziranog toplinskog sustava.....	5
Slika 2	Dijagram energetske tokove za odvojenu i kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije [20].....	9
Slika 3.	Lokacije kogeneracije na biomasu Ilovac i Toplana d.o.o.	19
Slika 4.	Prikaz variranja srednje vanjske temperature za grad Karlovac na satnoj razini ..	30
Slika 5	Shematski prikaz komponenti sustava za Scenarij 1.....	32
Slika 6	Shematski prikaz komponenti sustava za Scenarij 2.....	33
Slika 7	Prikaz distribucije cijena električne energije prema modelima 1 i 2 za dio sezone između 1. i 504. vremenskog intervala.	34
Slika 8	Shematski prikaz komponenti sustava za Scenarij 3.....	35
Slika 9	Prikaz ovisnosti rada kogeneracije na biomasu o potražnji iz mreže.....	37
Slika 10	Satna raspodjela i krivulja trajanja opterećenja u referentnom scenariju.....	37
Slika 11	Gubici topline nastali uslijed ispuštanja viška proizvedene topline u okoliš.	38
Slika 12	Satna raspodjela i krivulja trajanja opterećenja za Scenarij 1.	39
Slika 13	Prikaz razine napunjenosti spremnika 1 za cijelu sezonu grijanja.	39
Slika 14	Akumulacija ukupnih troškova tokom cijele sezone i ukupna ušteda ostvarena s obzirom na referentni scenarij.....	40
Slika 15	Analiza osjetljivosti za Scenarij 1 pri ugradnji dva različita spremnika.	41
Slika 16	Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja za spremnik kapaciteta 100 MWh pri različitim cijenama el. energije.	43
Slika 17	Napunjenosti spremnika kapaciteta 100 MWh pri različitim cijenama el. energije.	44
Slika 18	Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja za spremnik kapaciteta 500 MWh pri različitim cijenama el. energije.	45
Slika 19	Napunjenosti spremnika kapaciteta 500 MWh pri različitim cijenama el. energije.	47
Slika 20	Ukupna ušteda u odnosu na referentni scenarij za sva četiri slučaja.....	48
Slika 21	Analiza osjetljivosti za Scenarij 2 / Slučaj 1 pri ugradnji dva različita spremnika.	50
Slika 22	Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja pri ugradnji dizalice topline snage 4,5 MW i toplinskog spremnika kapaciteta 100 MWh.	52
Slika 23	Napunjenosti spremnika kapaciteta 100 MWh pri različitim cijenama el. energije.	53
Slika 24	Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja pri ugradnji dizalice topline snage 4,5 MW i toplinskog spremnika kapaciteta 500 MWh.	54
Slika 25	Napunjenosti spremnika kapaciteta 500 MWh pri različitim cijenama el. energije.	55
Slika 26	Akumulacija troškova i ukupna ušteda pri različitim cijenama električne energije.	56
Slika 27	Analiza osjetljivosti za Scenarij 2 / Slučaj 2 pri ugradnji dva različita spremnika.	58

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Kratki pregled tehnologije plinskih kotlova prema [6].	6
Tablica 2	Kratki pregled svojstava kogeneracijskih postrojenja na biomasu [6].	10
Tablica 3	Pregled specifikacija velikih dizalica topline s okolišem kao toplinskim izvorom [6].	13
Tablica 4	Specifikacije centraliziranog toplinskog sustava grada Karlovca	18
Tablica 5	Specifikacije poduzeća Toplana d.o.o. [8].	19
Tablica 6	Tehničke i ekonomske karakteristike jedinica za proizvodnju toplinske energije u CTS-u grada Karlovca.	29
Tablica 7	Tehničke karakteristike jedinica za proizvodnju toplinske energije u CTS-u grada Karlovca.	29
Tablica 8	Ulazni podaci vezani za analizirane kapacitete toplinskog spremnika.	33
Tablica 9	Tehno-ekonomski parametri ugradnje spremnika	34
Tablica 10	Ovisnost specifične cijene i volumena spremnika	34
Tablica 11	Prikaz ovisnosti faktora grijanja o temperaturi okoliša za analizirane dizalice topline.	35
Tablica 12.	Kombinacije za analizu različitih slučajeva ugradnje toplinskog spremnika i dizalice topline u CTS grada Karlovca.	36
Tablica 13	Tehno-ekonomske karakteristike analiziranih dizalica topline	36
Tablica 14	Prikaz tehničkih parametara rada vrelovodnog kotla za Scenarij 1.	40
Tablica 15	Minimum i maksimum vrijednosti NPV-a i IRR-a za Scenarij 1.	42
Tablica 16	Aktivnost dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju.	43
Tablica 17.	Vrijeme rada dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnoj snazi	46
Tablica 18	Prikaz tehničkih parametara vrelovodnog kotla za Slučaj 1 iz Scenarija 2.	49
Tablica 19	Prikaz tehničkih parametara dizalice topline za Slučaj 1 iz Scenarija 2.	49
Tablica 20	Minimum i maksimum NPV-a i IRR-a za Slučaj 1 Scenarija 2.	51
Tablica 21	Aktivnost dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju.	52
Tablica 22	Aktivnost dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju.	55
Tablica 23	Prikaz tehničkih parametara vrelovodnog kotla za Slučaj 2 iz Scenarija 3.	57
Tablica 24	Prikaz tehničkih parametara dizalice topline za Slučaj 2 iz Scenarija 3.	57
Tablica 25	Minimalan i maksimalan iznos NPV-a i IRR-a za Slučaj 2 Scenarija 3.	59
Tablica 26	Financijski i ekonomski tok novca za Spremnik 1	68
Tablica 27	Financijski i ekonomski tok novca za Spremnik 2	69
Tablica 28	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 1, Model 1.	70
Tablica 29	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 1, Model 2.	71
Tablica 30	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 2, Model 1.	72
Tablica 31	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 2, Model 2.	73
Tablica 32	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 1, Model 1.	74
Tablica 33	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 1, Model 2.	75
Tablica 34	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 2, Model 1.	76
Tablica 35	Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 2, Model 2.	77

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Δt	h	Promatrani vremenski interval
$c_{ele}(t)$	€/MWh	Cijena električne energije
CH_4	g/GJ _{goriva}	Metan
CO_2	-	Ugljični dioksid
COP	-	Faktor grijanja
COP_0	-	Tablična vrijednost faktora grijanja pri temperaturi
COP_1	-	Tablična vrijednost faktora grijanja pri temperaturi ϑ_1
c_{plin}	€/MWh	Cijena plina
CTS	-	Centralizirani toplinski sustav
DT	-	Dizalica topline
ε_0	%	Postotni udio inicijalne napunjenosti spremnika
EER	-	Faktor hlađenja
$\varepsilon_{gr}(COP)$	-	Faktor grijanja
$\varepsilon_{hl}(EER)$	-	Faktor hlađenja
ε_{min}	%	Postotni udio minimalne napunjenosti spremnika
$\eta(\dot{Q}_{VR.KOT}, t)$	-	Korisnost vrelovodnog kotla toplane
Φ_{isp}	W	Odvedena toplina na isparivaču dizalice topline u režimu hlađenja
Φ_{kond}	W	Dovedena toplina na kondenzatoru dizalice topline u režimu grijanja
IRR	%	Unutarnja stopa povrata investicije
HEP	-	Hrvatska elektroprivreda
k_1, k_2, k_3, k_4, k_5	-	Koeficijenti za određivanje stupnja djelovanja
KOG-BIO	-	Kogeneracija na biomasu
LU	-	Loživo ulje
LUEL	-	Ekstra lako loživo ulje
N_2O	g/GJ _{goriva}	Dušikov oksid
NO_x	g/GJ _{goriva}	Dušični oksidi
NPV	€	Neto sadašnja vrijednost
P_{DTmax}	MW	Maksimalna snaga dizalice topline
P_{el}	W	Dovedena snaga za pogon kompresora
P_{max_i}	MW	Maksimalna snaga postrojenja i

Oznaka	Jedinica	Opis
PP	-	Prirodni plin
PTV	-	Priprema tople vode
$P_{VR.KOT_{max}}$	MW	Maksimalna snaga vrelovodnog kotla
$\dot{Q}_{DT_{max}}$	MWh	Maksimalna toplinska energija na izlazu iz dizalice topline
$\dot{Q}_{DT}(t)$	MWh	Toplinska energija iz dizalice topline,
\dot{Q}_{god}	MWh	Ukupna isporučena toplinska energija za cijelu sezonu grijanja
\dot{Q}_{god_i}	MWh	Ukupna godišnja isporučena toplinska energija iz postrojenja i ,
$\dot{Q}_{KOGEN}(\dot{Q}_{POTR}, t)$	MWh	Toplinska energija iz kogeneracije na biomasu
$\dot{Q}_{KOGEN_{max}}$	MWh	Maksimalna količina toplinske energije na izlazu iz kogeneracije
\dot{Q}_{max_ulaz}	MWh	Maksimalan energetske tok na ulazu u spremnik
$\dot{Q}_{POTR}(\vartheta_v, t)$	MWh	Satna toplinska potražnja iz mreže
$\dot{Q}_{VR.KOT_{max}}$	MWh	Maksimalna toplinska energija na izlazu iz toplane
$\dot{Q}_{VR.KOT}(t)$	MWh	Toplinska energija iz vrelovodnog kotla
$S(t)$	MWh	Napunjenost spremnika u trenutku t
$S(t - 1)$	MWh	Napunjenost spremnika u trenutku $t - 1$
S_0	MWh	Početno stanje spremnika
SCOP	-	Sezonski faktor grijanja
SEER	-	Sezonski faktor hlađenja
S_{max}	MWh	Maksimalna napunjenost spremnika
S_{min}	MWh	Minimalna napunjenost spremnika
SS	°C	Stupanj sat
STP	MWh	Satno toplinsko opterećenje
$\sum_{t=1}^N \dot{Q}_{POTR}(t)$	MWh	Suma svih toplinskih tokova na izlazu iz spremnika
$\sum_{t=1}^N \dot{Q}_{ULAZ}(t)$	MWh	Suma svih toplinskih tokova na ulazu u spremnik
$\sum_1^{5088} SS$	°C	Zbroj svih SS tokom jedne sezone grijanja
τ_{ef}	h	Efektivan broj radnih sati pri maksimalnom opterećenju
ϑ_0	°C	Tablična vrijednost temperature pri faktoru grijanja COP_0
ϑ_p	°C	Unutrašnja temperatura prostorije
ϑ_v	°C	Vanjska temperatura
ϑ_1	°C	Tablična vrijednost temperature pri faktoru grijanja COP_1
VKLM50		Vrelovodni kotao snage 50 MW
z	€	Funkcija cilja

SAŽETAK

Visokoučinkovita kogeneracija i centralizirani sustavi grijanja i hlađenja imaju velik potencijal za smanjenjem troškova primarne energije, koji je u zemljama EU u velikoj mjeri neiskorišten. Centralizirani toplinski sustavi imaju veliku važnost u planiranju i vođenju budućih energetske sustava s obzirom da omogućavaju veću implementaciju obnovljivih izvora energije, veću fleksibilnost vođenja i potencijalno im smanjuju troškove. Primjena toplinskih spremnika može imati pozitivan utjecaj na centralizirani toplinski sustav povećavajući mu efikasnost rada proizvodnih jedinica, što često znači i smanjenje troškova. U kombinaciji s dizalicama topline toplinski spremnici imaju velik potencijal u integraciji obnovljivih izvora. Ovaj rad se bavi upravo implementacijom toplinskog spremnika i dizalice topline u centralizirani toplinski sustav. U sklopu rada izrađen je model za optimizaciju troškova rada, koji uključuje energetske tokove na izlazu iz analiziranih postrojenja, njihove učinkovitosti i rad toplinskog spremnika, na temelju kojeg je provedena analiza slučaja za grad Karlovac.

Ključne riječi: Toplinski spremnik, centralizirani toplinski sustav, nelinearno programiranje, dizalica topline, kogeneracija na biomasu.

SUMMARY

High efficiency cogeneration, together with district heating and cooling systems has great potential for reduction of primary energy consumption, which in EU countries is greatly unused. District heating systems are of great importance for planing and operating future energy systems because of their ability to implement renewable energy sources and high operational flexibility. Integration of thermal energy storage can be beneficial for district heating systems by increasing efficiency of their generation units, which usually means reduction in operating costs. In combination with heat pumps, thermal storage has great potential for integration of renewable energy sources. This thesis focuses mainly on implementation of thermal storage and heat pumps in district heating systems. Optimization model developed in this thesis includes output energy flows from production units, their efficiencies, and working schedule of thermal storage. Based on this input arguments case study of Karlovac has been conducted.

Key words: Thermal storage, district heating systems, nonlinear programming, heat pumps, biomass cogeneration.

1. UVOD

Sve aktualnija tema globalnog zatopljenja koja prema raznim modelima predviđa porast temperature zraka između 2°C i 6°C do kraja 21. stoljeća, i nepredvidivo kretanje cijena fosilnih goriva, posebice plina i nafte čije su cijene u proteklih 10 godina varirale i do 250%, glavni su uzrok implementacije sve većeg broja obnovljivih izvora energije u postojeće elektroenergetske sustave. Energetski sustavi danas, sa 9,08 milijardi tona godišnje na globalnoj razini, čine 25 % ukupnih emisija CO₂ [1][2]. U takvom scenariju očekivan je veliki porast broja obnovljivih intermitentnih izvora energije koji iziskuju povećanu fleksibilnost i stabilnost mreže [1]. Zbog obnovljivih izvora energije i novih liberaliziranih tržišta električnom energijom cijene neprekidno variraju te danas postoje situacije kada zbog viškova proizvodnje i premale potražnje cijene nago padaju, odnosno kada je potražnja visoka a proizvodnja niska cijene naglo rastu [3]. Mnogi europski elektroenergetski sustavi su preko kogeneracijskih postrojenja i DT (Dizalica topline) u direktnoj vezi s proizvodnjom topline [4]. Ta interakcija ima pozitivan utjecaj na oba sektora jer im daje mogućnost da iskoriste varijabilne cijene s tržišta. Ukoliko se ti sustavi povežu sa spremnicima električne ili toplinske energije, u kojima se za vrijeme niskih cijena pohranjuje, a za vrijeme visokih cijena isporučuje energija, njihov rad postaje iznimno fleksibilan, te se otvara nova mogućnost za ostvarivanje dodatnog profita [3][5][6][7].

U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj ugradnje toplinskog spremnika u CTS (centralizirani toplinski sustav) grada Karlovca kojem će od 2017.g. u pogon biti puštena visokoučinkovita kogeneracijska elektrana-toplana [8]. Također je analiziran i utjecaj ugradnje DT, koja toplinskom energijom iz okolnog zraka zagrijava vodu koju predaje u toplinski spremnik, kako bi se omogućila integracija obnovljivih izvora energije i što više smanjili troškovi goriva za pogon vrelovodnog kotla u Termoelektrani Karlovac [8].

Glavna hipoteza ovog diplomskog rada je interakcija DT i vrelovodnog kotla s toplinskim spremnikom. Ukoliko se u potpunosti iskoristi potencijal spremnika dobrim vođenjem pohrane i isporuke toplinske energije CTS bi profitirao:

- Smanjenjem ukupne količine goriva utrošene za proizvodnju toplinske energije,
- Povećanjem učinkovitosti CTS-a radi izbjegavanja proizvodnje viškova toplinske energije koja se u trenutnoj konfiguraciji ispušta u okoliš,

- Većom fleksibilnošću,
- Iskorištavanjem niskih cijena električne energije u slučaju implementacije DT.

Glavni cilj ovog rada je pružanje uvida u strategiju upravljanja radom jedinica za proizvodnju toplinske energije i toplinskog spremnika s obzirom na potražnju iz mreže CTS-a. Drugi cilj je provedba tehno-ekonomske analize za slučaj ugradnje toplinskog spremnika i DT u CTS.

Glavne zadaće su:

- Razvoj računalnog modela za optimizaciju sustava CTS-a s ciljem minimizacije troškova rada,
- Optimizacija sustava uz promjenu ulaznih parametara,
- Analiza isplativosti sustava s različitim cijenama i distribucijama električne energije,
- Tehno-ekonomska analiza sustava.

2. CENTRALIZIRANI SUSTAVI I DIZALICE TOPLINE

2.1. Centralizirani toplinski sustavi

Danas u svijetu vlada velika zabrinutost zbog problema u energetici koji su u direktnoj vezi s globalnim zatopljenjem. Značajnu ulogu u kreiranju rješenja tih problema imaju centralizirani toplinski i rashladni sustavi. Prvi ovakvi sustavi u Europi izgrađeni su sredinom 50ih godina 19. stoljeća, kada je uočen njihov potencijal za smanjenje potrošnje energije [9]. Ovakvi sustavi, čija je namjena grijanje i/ili hlađenje, energiju proizvode u centralnoj jedinici iz koje se ona putem energetske mreže transportira do krajnjih korisnika (stambeni, komercijalni ili industrijski sektor) [5][9]. Osim u Europi, Sjevernoj Americi i Japanu mreže visoke efikasnosti sve su popularnije i u zemljama poput Katara, Ujedinjenih Arapskih Emirata, Bliskog Istoka i Singapura, koje imaju porast ugradnje centraliziranih rashladnih sustava [5].

Generalno gledajući centralizirani energetske sustavi u urbanim sredinama s velikim brojem korisnika, ovisno o tehnologiji, izvedbi, lokaciji, te cijenama energenata i električne energije, imaju nešto niže troškove od distribuiranih sustava, poput električnih grijalica, rashladnih uređaja, plinskih bojlera i drugih manje zastupljenih tehnologija koje se koriste za grijanje i hlađenje kućanstava i poslovnih prostora [9]. U takvim sredinama jedna i druga izvedba imaju svoje prednosti i nedostatke, no u većini slučajeva znatno manji utjecaj na okoliš zbog manjih emisija CO₂, jednostavnije regulacije opterećenja i nižih troškova pogona imaju centralizirani sustavi [5][9][10].

Prema najjednostavnijoj podjeli centralizirani energetske sustavi sastoje se od centralnog postrojenja za proizvodnju toplinske ili rashladne energije, distribucijske mreže te opreme koju koriste krajnji korisnici [5][11]. Centralizirano postrojenje često je spojeno s potrošačima preko najmanje dva cjevovoda, od kojih jedan isporučuje a drugi vraća medij za transport energije. Stlačena para ili voda najčešće se koriste za grijanje dok se hladna voda i smjese na bazi alkohola koriste za hlađenje [5]. Mediji za transport energije gotovo uvijek se nalaze u recirkulirajućem zatvorenom krugu, no postoje i izvedbe otvorenog tipa bez recirkulacije, gdje sav transportni medij ostaje kod krajnjeg potrošača [11]. U većini slučajeva cjevovodi su dobro izolirani dok se veliki pad tlaka zbog trenja u cijevima regulira kompresorskim međustanicama ili pumpama [5].

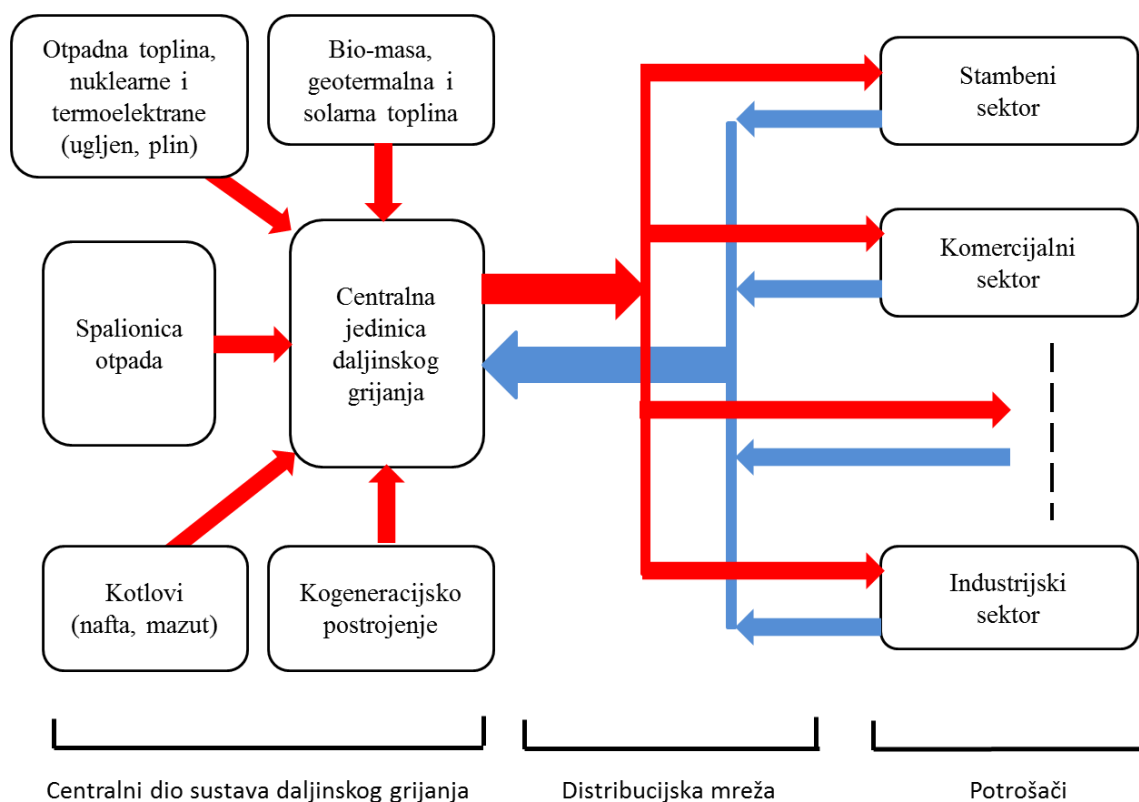
CTS-i imaju slične karakteristike kao i električni sustavi, a koje se odnose na centraliziranu proizvodnju energije, pouzdanost proizvodnje i isporuke te sve veću zastupljenost tehnologija koje koriste obnovljive izvore energije [5][11]. Glavne značajke ovakvih CTS-a su [5]:

- Visoka pouzdanost isporuke - u slučaju kvarova akumulirana toplinska energija u mreži sustava dovoljna je za pokrivanje potražnje od nekoliko sati koliko je najčešće dovoljno za otklanjanje manjih kvarova na jedinicama za proizvodnju;
- Sigurnost – kod krajnjeg korisnika nalazi se samo potrošačka jedinica sastavljena od izmjenjivača, pumpi i cjevovoda bez komore za izgaranje koja zahtjeva priključak na plinsku mrežu, spremnik za lož ulje ili prostor za skladištenje drva i ugljena kod kojih uvijek postoji opasnost od požara ili eventualne eksplozije;
- Minimalna potreba za održavanjem – troškovi održavanja su minimalni s obzirom da se gotovo sve rizične komponente sustava nalaze u jedinicama za proizvodnju koje u potpunosti snose troškove održavanja bez značajnog utjecaja na cijenu za krajnjeg korisnika;
- Niži investicijski troškovi – ugradnja velikog broja malih decentraliziranih uređaja iste snage i kapaciteta kao jedno veliko postrojenje, zbog većeg broja komponentni, u većini slučajeva je skuplje, posebice ako je riječ o urbanim sredinama s velikim brojem potrošača;

U posljednjim desetljećima CTS-i doživjeli su velik napredak, no unatoč tome njihov udio u ukupnoj proizvodnji toplinske energije za grijanje na globalnoj razini je u blagom padu. Za razliku od 1992.g. kada je ukupna energija za grijanje prostora putem CTS-a prema [12] iznosila 17.000 PJ godišnje danas se ona kreće oko 11.000 PJ godišnje. Jedini značajan porast udjela grijanja preko CTS-a imaju članice EU15 čiji je udio u porastu od oko 2% na godišnjoj razini i sada iznosi oko 1.000 PJ [13][14].

Sustavi CTS-a podijeljeni su na četiri generacije. *Prva generacija*, koja koristi paru kao nosioca toplinske energije, prvi puta se pojavila oko 1880.-ih, a do 1930.g. gotovo sva postrojenja koristila su tu tehnologiju. Danas se ova tehnologija, iz sigurnosnih razloga i zbog visokih toplinskih gubitaka, smatra zastarjelom. Ovakvi sustavi danas se još koriste u Manhattanu, Parizu i dijelu Kopenhagena [15]. *Druga generacija* koristila je toplu vodu pod tlakom, s temperaturama višim od 100°C. Ovakvi sustavi pojavili su se 1930-ih i ostali su dominantna tehnologija sve do 1970-ih. Ostanke ove tehnologije danas je još uvijek moguće pronaći u starijim komponentama današnjih vrelovodnih toplinskih sustava [15]. *Treća*

generacija pojavila se 1970-ih, a potpunu dominaciju ostvarila je sredinom 1980-ih. Ova generacija i dalje koristi vodu pod tlakom, no sada su temperature niže od 100°C. Danas gotovo svi novoizgrađeni CTS-i Srednje Europe, SAD-a, Kanade, Kine, bivše članice SSSR-a, Kore-e i Japana koriste ovu generaciju [15]. Za razliku od prve tri generacije *četvrta generacija* uključuje energetske učinkovitije zgrade i rad pametnih energetskih mreža. Ova generacija definira se kao dosljedan tehnološki i institucionalni sustav. Korištenjem pametnih mreža, u sustav su ukomponirani održivi energetske sustavi koji isporučuju toplinsku energiju niskoenergetskim zgradama putem visokučinkovite mreže, koja ima niske toplinske gubitke, integriranjem niskotemperaturnih izvora kojima se temperatura radnog medija kreće između 50 i 60°C [15].



Slika 1. Shematski prikaz centraliziranog toplinskog sustava

U današnje vrijeme tipičan CTS pruža usluge grijanja različitim potrošačima od kućanstava, uslužnog i javnog sektora do industrijskih postrojenja. Na Slici 1. prikazan je CTS gdje se s lijeve strane nalaze postrojenja koja se najčešće koriste za proizvodnju toplinske energije, u srednjem dijelu mreža za distribuciju topline od izvora do potrošača, a s desne strane nalaze se krajnji potrošači. U CTS-u najveći utjecaj na izvedbu distribucijske mreže ima korisnik koji potražuje najviše topline i zahtjeva najvišu temperaturu tople vode.

2.2. Vrelovodni kotlovi za proizvodnju toplinske energije

Većina postrojenja za proizvodnju toplinske energije u hrvatskoj pogonjena je vrelovodnim ili parnim kotlovima, te kogeneracijama koje kao gorivo najčešće koriste prirodni plin, ekstra lako loživo ulje ili mazut [14]. U ložište kotla dovodi se gorivo koje izgara, te se tako nastali dimni plinovi koriste za zagrijavanje vode ili proizvodnju pare koja se isporučuje u mrežu CTS-a. Ovakva postrojenja mogu biti nadograđena s ekonomajzerom kako bi se smanjili toplinski gubici dimnih plinova [6]. Moderni visokoučinkoviti plinski kotlovi danas rade s kliznim temperaturama radnog medija, što znači da im se pri svakom opterećenju temperatura dimnih plinova bitno razlikuje. Upravo promjenjiva temperatura dimnih plinova na izlazu iz kotla ovim postrojenjima omogućuje najučinkovitiji rad pri najnižim opterećenjima. Iako su ova postrojenja stara i do nekoliko desetljeća u većini hrvatskih gradova to su jedini izvori toplinske energije u CTS [14]. Kratki pregled tehnologije plinskih kotlova za proizvodnju toplinske energije s tipičnim snagama, učinkovitostima pretvorbe goriva u toplinsku energiju, investicijskim troškovima i emisijama prikazan je u Tablici 1. [6]. Ovo je tehnologija s visokim stupnjem razvijenosti i komercijalne dostupnosti, u kojoj se jedini napredak može ostvariti u smanjenju emisija stakleničkih plinova [6].

Tablica 1. Kratki pregled tehnologije plinskih kotlova prema [6].

Naziv	Plinski kotao		
	2015.	2020.	2030.
Snaga (MW)	0,5 - 50	0,5 - 50	0,5 - 50
Ukupna neto učinkovitost (%)	97 – 105 ¹	97 - 105	97 - 105
Dostupnost (%)	98 - 99	98 - 99	98 - 99
Životni vijek (g)	30 - 40	30 - 40	30 - 40
Vrijeme izgradnje (g)	0,5 - 1	0,5 - 1	0,5 - 1
Nominalna investicija (M€/MW)	0,07 – 0,13	0,07 – 0,13	0,07 – 0,13
Pogon i održavanje (€/MW/g)	1200 - 6200	1200 - 6200	1200 - 6200

2.3. Kogeneracija na biomasu

Biomasa

Kroz povijest biomasa je bila najvažniji izvor energije zadovoljavajući energetske potrebe većine korisnika od kućanstava pa do velikih industrijskih postrojenja. Danas se biomasa smatra obnovljivim izvorom energije koja se može koristiti kao zamjena za fosilna goriva u

¹ Iznosi preko 100% su zbog plinske kondenzacije

proizvodnji toplinske i električne energije. Biomasom se smatraju svi biljni ili materijali biljnog podrijetla koji pohranjuju energiju procesom fotosinteze u kojem biljke pretvaraju sunčevu u kemijsku energiju. Kemijska energija se pohranjuje u ugljikohidratnim molekulama poput šećera, koji su produkt spajanja ugljičnog dioksida i vode. Dodatna vrijednost ovog procesa je oslobađanje kisika koji je ključan za život na Zemlji [16].

Biomasa se smatra ograničenim obnovljivim izvorom energije. Za razliku od vjetra, solarne i hidro energije, biomasi je potreban dugi vremenski period za akumulaciju energije. Većinom je to duže od par godina, zbog čega uporaba biomase zahtjeva oprezno dugoročno planiranje. Kako na globalnoj razini svjetska populacija neprestano raste, raste i potreba za sve većom proizvodnjom hrane. Oduzimanje prostora za poljoprivredne površine često se kosi sa sadnjom visokoenergetske biomase. Druga razlika u odnosu na ostale obnovljive izvore energije je mogućnost generiranja isključivo toplinske energije, dok je većinu ostalih obnovljivih izvora moguće direktno pretvarati u mehaničku (vjetar, valovi, plima i oseka) ili električnu energiju (sunce, vodik) [16]. Prema Rosillo Calleovoj knjizi [17], biomasa uključuje širok spektar proizvoda, poluproizvoda i otpadnih materijala iz drvne industrije i poljoprivrede. Neki od tih materijala su:

- Drva i drveni otpad nastao pri piljenju, brušenju, i ostalim postupcima obrade drva,
- Alge,
- Ostaci sezonskih žitarica poput slame, kukuruzovine, stabljike, koštice i dr.,
- Kanalizacijski otpad i mulj iz kolektora otpadnih voda,
- Industrijski bio-otpad,
- Organske frakcije iz krutog otpada,
- Biomasa iz parkova i vrtova s javnih površina,
- Gnoj.

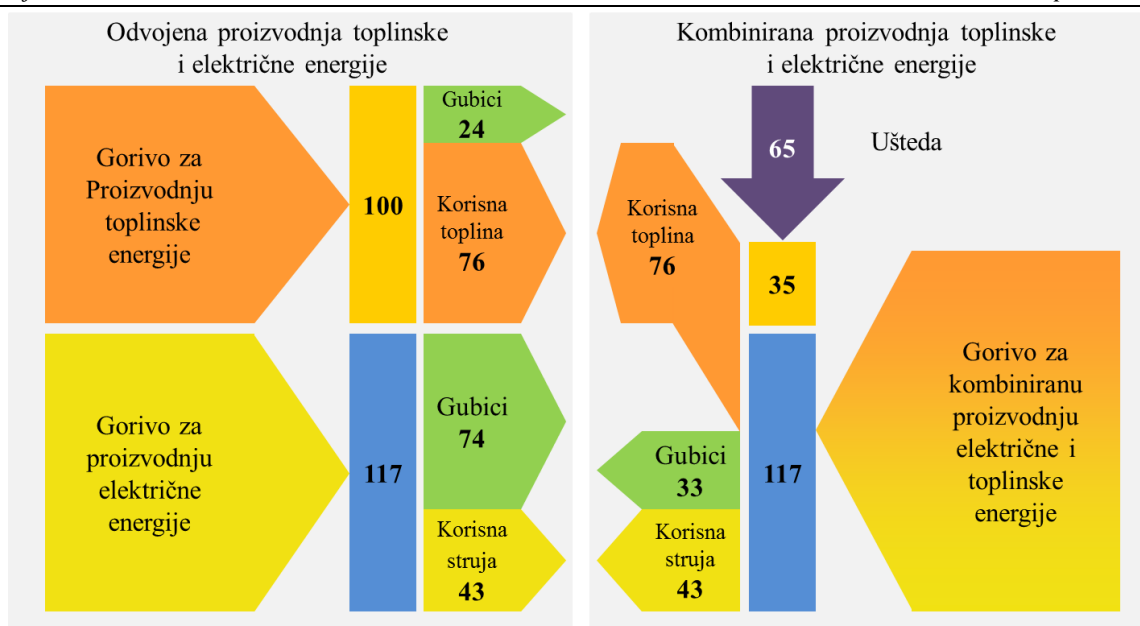
Način na koji se energija biomase proizvodi ili iskorištava ovisi o mnogim faktorima poput tehnologija pretvorbe, specifičnih fizikalnih i kemijskih svojstva tvari te energetske potreba procesa. Za proizvodnju toplinske i električne energije direktnim izgaranjem moguće je korištenje bilo kojeg ranije navedenog oblika biomase, no danas se ipak najčešće koristi drvo [16][17].

Biomasa se smatra obnovljivim izvorom energije jer je dio zatvorenog ugljičnog ciklusa. Ugljik iz atmosfere se procesom fotosinteze transformira u klorovodike koji se pohranjuju u

stabljkama biljaka. Kada biljka uvene započinje proces dekompozicije tokom kojeg se u atmosferu ponovno ispuštaju voda i ugljični dioksid te oslobađa toplina. Ugljik oslobođen ovom dekompozicijom ponovno se apsorbira u atmosferu što rezultira zatvorenim ciklusom u kojem nema povećanja udjela ugljika. Iskorištavanje biomase kao goriva taj ciklus je ubrzan. Pravilnim gospodarenjem biomasom moguće je održati ovaj ciklus neutralnim.

Kogeneracijsko postrojenje na biomasu

Spaljivanjem biomase moguće je, uz pomoć parne turbine, proizvesti električnu i toplinsku energiju. Tipična snaga ovih postrojenja je i do 10 puta manja od onih na ugljen i kreće se između 1 i 100 MW [6][18]. Razlog tome je nedovoljna količina biomase na lokalnoj razini te visoki troškovi transporta. U nekim slučajevima investicijski troškovi takvih postrojenja prema [6] kreću se, ovisno o vrsti biomase i veličini postrojenja, između 2,60 i 4,60 M€/MW i gotovo su dvostruko veći u odnosu na investicijske troškove za izgradnju kogeneracija na ugljen koji su procijenjeni na 2,03 M€/MW. Tipična efikasnost proizvodnje električne energije kogeneracije kreće se između 30 i 40% [6]. Ova tehnologija dobro je rješenje za potrošnju otpadne biomase koja se pretvara u sječku visoke ogrjevne vrijednosti. Izgaranjem takvog goriva u parnom kotlu postižu se temperature od 540°C [18][19]. U tipičnim postrojenjima pri istovremenoj proizvodnji toplinske i električne energije električna efikasnost kreće se između 32 i 35%, dok pri proizvodnji samo električne energije mogu postići i efikasnosti od 40% [6][18][19]. Energija iz fosilnih goriva za rad ovakvog postrojenja iznosi između 2 i 5% ukopno utrošene energije za proizvodnju [18]. Analize životnog ciklusa ovakvih postrojenja pokazale su da se emisije stakleničkih plinova, unatoč neutralnom ugljičnom ciklusu, kreću između 2 i 10% onih na fosilna goriva [6]. Nova postrojenja mogu doseći i ukupan stupanj učinkovitosti i veći od 80% ukoliko je snaga postrojenja dobro dimenzionirana za potražnju iz toplinske mreže te ukoliko se kao gorivo koristi biomasa u kombinaciji s krutim otpadom [6][18].



Slika 2 Dijagram energetskega tokova za odvojeno i kombinirano proizvodnju toplinske i električne energije [20].

Slika 2 prikazuje energetske tokove pri odvojenoj i kombiniranoj proizvodnji toplinske i električne energije. Kada se toplinska i električna energija proizvode u odvojenim postrojenjima njihovi gubici su i do 30% veći u odnosu na proizvodnju u postrojenju s kombiniranom proizvodnjom toplinske i električne energije. Razlog tome je korištenje jedne turbine s reguliranim oduzimanjem koja putem generatora proizvodi električnu energiju a ostalu otpadnu toplinu iskorištava za proizvodnju toplinske energije koja se koristi za industrijske procese, grijanje prostora ili pripremu tople vode. Danas većina novo izgrađenih postrojenja koristi sličnu tehnologiju [20].

Tablica 2 prikazuje kratki pregled kogeneracijskih postrojenja na biomasu snage između 10 i 50 MW, koja za gorivo koriste drvenu sječku. U tablici se nalaze podaci vezani za električnu i toplinsku učinkovitost, životni vijek, emisije stakleničkih plinova, raspon snaga te investicijski i pogonski troškovi [6].

Tablica 2 Kratki pregled svojstava kogeneracijskih postrojenja na biomasu [6].

Tehnologija	Kogeneracija na biomasu (sječka)		
	2015.	2020.	2030.
Snaga (MW)	10 - 50	10 - 50	10 - 50
Neto električna učinkovitost (%)	29	29	29
Neto toplinska učinkovitost (%) bez plinske kondenzacije	64	-	-
Neto toplinska učinkovitost (%) s plinskom kondenzacijom	77	-	-
Dostupnost (%)	90	90	90
Životni vijek (g)	30	30	30
Vrijeme izgradnje (g)	4,5	4,5	4,5
Nominalna investicija (M€/MW)	2,6	2,6	2,6
Pogon i održavanje (€/MW/g)	29.000	29.000	29.000

2.4. Dizalica topline

DT se smatraju visokoučinkovitim uređajima za grijanje i hlađenje različitih objekata [21]. Primjenjuju se u svim veličinama, od onih najmanjih, npr. za grijanje i hlađenje stanova, pa sve do sustava koji poslužuju čitava naselja. Najviše se koriste za niskotemperaturne sustave grijanja, s temperaturom polaznog voda već od 35°C u slučaju površinskih grijanja, te s temperaturom polaznog voda do 55°C kod zagrijavanja PTV-a. Prema [22] temperatura polaznog voda visokotemperaturnih industrijskih dizalica topline može doseći i 140 °C. DT posreduje u prijenosu topline između dva toplinska spremnika: niskotemperaturnog, kojem se toplina odvodi te visokotemperaturnog, kojem se toplina dovodi, uvećana za snagu kompresora. U DT (većinom kompresijskim) odvija se ljevokretni kružni proces, u kojem radna tvar posreduje u prijenosu topline između toplinskih spremnika [21].

Sustav DT sastoji se od tri kruga: kruga izvora topline, kruga radne tvari i kruga ponora topline [21]. Kod otvorenih sustava podzemna voda nastrujava neposredno preko isparivača DT. Kod sustava s izmjenjivačem topline u tlu kao posrednik u prijenosu topline u zatvorenom krugu struji glikolna smjesa, povezujući izmjenjivač topline u tlu s isparivačem radne tvari. Ogrjevni medij grijanog objekta mogu biti voda ili zrak. Voda se koristi u slučaju primjene površinskih sustava grijanja, ventilokonvektora ili radijatora. U nekim slučajevima, umjesto vode, zrak se zagrijava neposredno na kondenzatoru DT i razvodi po objektu putem

kanala za zrak. Moguće su izvedbe i s isparivačem koji je direktno položen horizontalno u tlo. Za sada takvi sustavi nisu razvijeni u mjeri koja bi omogućila njihovu praktičnu primjenu. DT može raditi u režimu grijanja i u režimu hlađenja. Ugradnjom četveroputnog ventila isti se uređaj može prilagoditi i za rad u režimu hlađenja. U tom slučaju ponor topline postaju tlo, podzemna voda ili okolišni zrak, dok se topline rashladnog prostora odvodi na isparivaču DT posredstvom zraka ili vode/glikolne smjese [21].

Kako su DT mehanički uređaji kojima je potreban rad za grijanje ili hlađenje, važno je razumijevanje energetske učinkovitosti sustava. Energetska učinkovitost (valjanost) rashladnog uređaja u režimu hlađenja ocjenjuje se faktorom hlađenja (engl. energy efficiency ratio - EER) za uvjete koji su dani u normi HRN EN 14511 ($\vartheta_{hl} = 27^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_{ok} = 35^{\circ}\text{C}$) [23]. Valjanost ogrjevnog procesa DT u režimu grijanja ocjenjuje se faktorom grijanja ili toplinskim množiteljem (engl. Coefficiente of performance). Oba faktora definirana su u izrazima (1) i (2) a predstavljaju omjer odvedene ili dovedene topline u ili iz sustava i dovedene snage za odvijanje procesa:

$$\varepsilon_{hl}(EER) = \frac{\text{Odvedena toplina}}{\text{Dovedena snaga}} = \frac{\Phi_{isp}}{P_{el}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{gr}(COP) = \frac{\text{Dovedena toplina}}{\text{Dovedena snaga}} = \frac{\Phi_{kond}}{P_{el}} \quad (2)$$

Pri čemu je:

- $\varepsilon_{hl}(EER)$, faktor hlađenja, (-),
- $\varepsilon_{gr}(COP)$, faktor grijanja, (-),
- Φ_{isp} , odvedena toplina na isparivaču dizalice topline u režimu hlađenja, (W),
- Φ_{kond} , dovedena toplina na kondenzatoru dizalice topline u režimu grijanja, (W),
- P_{el} , dovedena snaga za pogon kompresora, (W).

Norma EN 14825 nalaže da se sve DT razvrstavaju u energetske razrede prema režimu rada, ovisno o tome koriste li se za grijanje ili za hlađenje [24]. Rad energetske učinkovitosti DT u režimu hlađenja određuje sezonski faktor hlađenja (engl. Seasonal efficiency ratio - SEER), kako je to definirano u izrazu (3), a u režimu grijanja sezonski faktor grijanja (engl. Seasonal coefficient of performance - SCOP), kako je to definirano u izrazu (4). Sezonski faktori grijanja i hlađenja navedeni u jednadžbama (3) (4) razlikuju se od običnih faktora grijanja i

hlađenja jer promatraju energetske tokove kroz cijelu sezonu, što na koncu daje bolju aproksimaciju stvarne učinkovitosti sustava [21][22][24].

$$SEER = \frac{\text{Sva odvedena energija za hlađenje}}{\text{Sva dovedena električna energija za hlađenje}} = \frac{\sum \Phi_{isp}}{\sum P_{el}} \quad (3)$$

$$SCOP = \frac{\text{Sva dovedena energija za grijanje}}{\text{Sva dovedena električna energija za grijanje}} = \frac{\sum \Phi_{kond}}{\sum P_{el}} \quad (4)$$

Za razliku od idealnih ciklusa u kojima ne postoje gubici, kod realnih uređaja uvijek su prisutni gubici uslijed trenja fluida, koji za posljedicu imaju pad tlaka u sustavu, i gubici izmjene topline s okolišem kroz komponente sustava [21].

DT, prema kapacitetu i snazi, dijele se u tri skupine: male DT toplinske snage na izlazu u rasponu od 0,5 do 25 kW, srednje DT toplinske snage 25 do 3000-5000 kW i velike toplinske snage veće od 5000 kW [6]. DT omogućeno je pretvaranje viškova proizvedene električne energije u toplinsku, koja se današnjim tehnologijama znatno lakše pohranjuje. Velike DT često rade kontinuirano, no postizanje maksimalne snage moguće je u vrlo kratkom vremenskom periodu, često i kraće od 5 min [6].

Glavna prednost DT je visoka učinkovitost i fleksibilnost, posebice u kombinaciji s obnovljivim izvorima i pri iskorištavanju otpadne topline, mogućnost niskotemperaturnog i visokotemperaturnog rada, koji u obje izvedbe ima relativno visok faktor grijanja, odnosno hlađenja. Nedostatak DT u odnosu na druge tehnologije za proizvodnju toplinske energije je kompliciranija izvedba koja znatno povisuje investicijske troškove. Pogonski troškovi i troškovi održavanja su im vrlo niski. Uporabom po atmosferu neagresivnih radnih tvari negativan utjecaj na okoliš značajno je smanjen, no ova tehnologija obnovljiva je koliko je obnovljiv izvor električne energije koju koristi za pogon [6][21].

Tablica 3 sadrži kratak pregled specifikacija velikih DT koje kao toplinski izvor koriste zrak iz okoliša. U tablici su ukratko prikazane okvirne vrijednosti toplinskog učinka životnog vijeka opreme te investicijski i troškovi pogona i održavanja.

Tablica 3 Pregled specifikacija velikih dizalica topline s okolišem kao toplinskim izvorom [6].

Tehnologija	Velike dizalice topline (izvor okoliš)		
	2015.	2020.	2030.
Snaga (MW)	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Toplinski učinak COP	2,8	2,9	3
Životni vijek (g)	20	20	20
Vrijeme izgradnje (g)	0,5 - 1	0,5 - 1	0,5 - 1
Radna tvar	neutralna		
Nominalna investicija (M€/MW)	0,52 – 0,84	0,47 – 0,79	0,42 – 0,73
Pogon i održavanje (€/MW/g)	3.700 – 7.300	2.400 – 4.900	2.400 – 4.900

2.5. Toplinski spremnik

Postoje različite metode za pohranu energije: toplinska, kemijska, termokemijska, mehanička i elektromagnetska. Izbor načina pohrane ovisi o mnogim čimbenicima, a jedan od najvažnijih je vremenski interval pohrane. Tako postoji više vrsta spremnika, no najjednostavnija podjela dijeli ih na spremnike s kratkotrajnom i spremnike dugotrajnom pohranom energije [6]. U CTS-u najvažniji oblik energije je toplota kojom se zagrijevaju objekti iz mreže pa su u ovom radu najzanimljiviji spremnici za pohranu toplinske energije. Kako CTS radi u temperaturnom režimu između 60°C i 120°C idealna vrsta spremnika je ona koja za medij pohrane koristi vodu [7][15]. Postoji nekoliko vrsta takvih spremnika, no najrašireniju primjenu imaju izolirani spremnici topline, spremnici topline u vodnosnosom sloju i bušotinski toplinski spremnici. Ugradnja toplinskog spremnika ima mnoge prednosti kao što su to: smanjenje troškova vršnih opterećenja, pohranom energije u trenucima jeftine i isporukom u trenucima skupe proizvodnje toplinske energije, povećanje efikasnosti sustava, smanjenjem gubitaka uslijed rada postrojenja s visokom efikasnošću te integracija obnovljivih intermitentnih izvora poput sunca i vjetra [7][25]. Glavni nedostaci ovih uređaja su učinkovitost pohrane, prvenstveno zbog izmjene topline s okolinom, i investicijski troškovi koji, ovisno o vrsti i tipu spremnika, te radnoj tvari i mjestu ugradnje, mogu znatno varirati [6][26].

2.5.1. Izolirani spremnici topline s vodom kao radnim medijem

Zbog svoje visoke specifične toplinske vodljivosti, netoksičnosti i široke rasprostranjenosti voda je jedan od najzastupljenijih medija za pohranu toplinske energije. Izolirani spremnici topline koriste se za pohranu tople i hladne vode ovisno da li se primjenjuju za potrošnu toplu

vodu, grijanje ili hlađenje [7]. Kako se ovaj rad odnosi na ugradnju toplinskog spremnika u CTS, u daljnjim razmatranjima u fokusu će biti samo spremnici tople vode.

Glavne prednosti i nedostaci ovakvih spremnika prema [6] i [7] su:

- Mogućnost ugradnje u gotovo sve sustave,
- Dostupnost u gotovo svim veličinama od 0,01 m³, za PTV u kućanstvima do 50.000 m³ u CTS-u za sezonsku pohranu toplinske energije cijelih naselja,
- Tehnologija koja je na svom vrhuncu,
- Visoka cijena investicije od 120 do 450 €/m³,
- Problem izolacije,
- Konstrukcija velikih spremnika ograničena oblikom (kugla ili valjak).

Spremnike je moguće ugraditi podzemno i nadzemno, gdje je prva varijanta zbog troškova ukopavanja skuplja [6]. Takvi sustavi imaju mogućnost pohrane toplinske energije od par sati pa sve do nekoliko tjedana i mjeseci, te tako postoji širok spektar kapaciteta [7].

Sve je češća primjena sezonskih toplinskih spremnika u kombinaciji sa solarnim kolektorima [7]. Putem solarnih kolektora sunčeva energija se tokom ljetnih mjeseci pohranjuje u spremnik, te se zimi isporučuje potrošačima ovisno o potražnji. Tako je u Friedrichshafenu 1996.g. za naselje od 280 stambenih jedinica izgrađen prvi sezonski spremnik kapaciteta 12.000 m³, u kombinaciji s solarnim kolektorima površine 4.050 m². Spremnik je izrađen od betona i ukopan je u zemlju. Kamenom vunom debljine između 20 i 30 cm, izoliran je od okolišnog tla. To je ujedno i najveći spremnik takvog tipa ikada izgrađen a godišnje pohrani do 2.300 MWh toplinske energije. Cijena investicije iznosila je 120 €/m³ ekvivalenta volumena vode. Danas se cijena takvih spremnika kreće između 120 i 450 €/m³ ekvivalenta volumena vode [27].

2.5.2. Toplinski spremnik u vodosnom sloju

Prema [25] vodonosnik je podzemni sloj sastavljen od propusnih materijala poput šljunka, pijeska ili gline, kroz koji struji podzemna voda. Najčešći udio vode u tom sloju je oko 25%. Vodu koja se s površine slijeva, preko propusnih i oko nepropusnih slojeva, u dublje slojeve tla moguće je presresti izgradnjom dubinskih bunara. Ideja iza ovoga je da se „mokri sloj“ koristi za skladištenje toplinske energije. Važno je napomenuti da se toplina osim u vodi skladišti i u krutom sloju. Kako bi se toplina pohranila u vodonosniku potrebno je izgraditi

dva bunara (takozvani par), jedan služi za izvlačenje vode (proizvodni bunar), a drugi služi za ponovno ubrizgavanje vode u vodonosnik [26].

Kapacitet pohrane ovakvih spremnika, prema [26], najviše ovisi o:

- Rasponu dozvoljenih temperatura koje su propisane normama,
- Koeficijentu toplinske provodnosti,
- Jačini strujanja podzemne vode u vodonosniku.

Uobičajen raspon temperatura za pohranu je između 10 i 50°C, no postoje praktične izvedbe gdje se toplina iz termoenergetskih postrojenja pohranjuje na temperaturama u rasponu od 60 do 80°C [25]. Ovisno o kapacitetu ovakvi spremnici imaju mogućnost zadržavanja toplinske energije i do nekoliko mjeseci, i to uz učinkovitost između 50 i 90% [28]. Ovi sustavi mogu biti sastavljeni od nekoliko parova čime im se povećava kapacitet. U rijetkim slučajevima toplinsku i rashladnu energiju moguće je pohraniti u jednom bunaru gdje se različiti slojevi nalaze jedan ispod drugoga. U tom slučaju riječ je o jeftinijoj izvedbi jer su troškovi kopanja dvostruko niži, no mogućnost pohrane toplinske energije je niža. Najčešća dubina bunara je između 20 i 200 m a ovisi o dubini na kojoj se nalazi vodonosni sloj [7].

Glavni nedostaci ove tehnologije su:

- Začepljenja bunara zbog taloženja nečistoća,
- Propusnost,
- Stvaranje pješčanog sedimenta u cijevima koji oštećuje opremu.

Najčešći od gore navedenih problema su začepljenja. Ona nastaju prvenstveno zbog taloženja željeza koje je dovoljno sitno da zajedno s vodom struji kroz propusni sloj. S vremenom se na vodopropusnim zidovima bunara stvara talog tih željeznih čestica koji znatno smanjuje protok vode a samim time i kapacitet spremnika [26].

Jedan od primjera ugradnje ovog tipa spremnika je iz njemačkog grada Neubrandeburga gdje je 2003. u CTS s kogeneracijskim postrojenjem ugrađen sezonski spremnik za pohranu toplinske energije u vodonosniku koji radi u temperaturnom režimu 80°C/45°. Obližnje naselje, koje je spojeno na mrežu CTS-a, ima godišnju potražnju od 18.000 MWh, a godišnji kapacitet spremnika iznosi 12.000 MWh. Pohranjena energija koja se iz spremnika isporuči u mrežu iznosi 8.600 MWh na godinu što je ekvivalentno 72% efikasnosti ovog spremnika. Uspješnosti ovog projekta najviše je doprinijelo redovno i kvalitetno održavanje, zbog kojeg

do danas još nije bilo većih kvarova. Povrati investicije od 3 milijuna eura ostvaren je već nakon 2 godine rada [26].

Generalni zaključci vezani za toplinski spremnik u vodonosnom spremniku prema [25] i [26]:

- Kratak rok povrata investicije (2 – 4 godine ovisno o veličini),
- Troškovi održavanja i istraživanja podzemlja su viši nego kod drugih podzemnih spremnika toplinske energije,
- Jednostavna izvedba,
- Česta začepljenja bunara,
- Bez zvučnih smetnji i vizualnog narušavanja okoliša.

Ovaj tip pohrane toplinske energije vrlo je profitabilan u sustavima klimatizacije i hlađenja jer se često koristi u kombinaciji s dizalicama topline koje imaju COP između 2 i 4 [21]. Kada je riječ o sustavima grijanja ovakav spremnik najčešće nije prvi izbor, pa je broj ovakvih sustava, za razliku od ostalih u svijetu, jako malen [7].

2.5.3. Bušotinski toplinski spremnik

Bušotinski toplinski spremnik prema [7] sastoji se od bunara u koji su položene U-cijevi. Najčešći medij koji struji kroz cijevi je mješavina vode i antifrizna odnosno glikol. U ovom slučaju toplina se pohranjuje u tlu te kapacitet spremnika direktno ovisi o svojstvima tla. Kod bušotinskih toplinskih spremnika toplina se pohranjuje u toplim mjesecima preko solarnih kolektora ili uz pomoć DT, ili kada je dostupna otpadna toplina iz nekog industrijskog postrojenja ili termoenergetskog bloka [20]. Preko jednog od tih procesa tlo oko bušotine se zagrijava te se energija na taj način pohranjuje za kasniju isporuku [7].

Primjer primjene ovakvog toplinskog spremnika je u Stuttgartu u Njemačkoj. Postrojenje je izgrađeno 2002.g., a sačinjeno je od 18 bušotina dubine 55 m, koje su povezane na dizalicu topline. Ovo postrojenje namijenjeno je za grijanje i hlađenje. Energetsko opterećenje prostora ljeti i zimi je slično te iznosi 42,5 MWh/godišnje. Izračunima je pokazano da ušteda električne energije iznosi 120 MWh/g, što je ekvivalentno utrošku 205 MWh/g primarne energije [7].

Principi pohrane toplinske energije isto kao i kapaciteti slični su onima u vodonosnom sloju. Početna investicija u ovom slučaju je zbog ugradnje U-cijevi i DTe veća, zbog čega je i povrati investicije nešto duži. Prednost ugradnje ovog spremnika je jednostavnije izdavanje

uporabne dozvole jer ne postoji direktan doticaj radne tvari s podzemnim vodama. Druga prednost ovog sustava je ta da zbog U-cijevi ne postoji opasnost od začepljenja niti prodiranja drugih čestica u radnu tvar, što znatno produljuje životni vijek opreme [25].

3. ANALIZA POSTOJEĆEG SUSTAVA

U ovom poglavlju detaljnije su opisane jedinice za proizvodnju toplinske energije u CTS-u grada Karlovca. Najviše pažnje posvećeno je opisu tehnologija koje se koriste za proizvodnju toplinske energije u pojedinim postrojenjima te gorivu koje koriste za pogon. Za svaku tehnologiju navedeno je postojeće stanje te je analizirana mogućnost ugradnje novih.

Toplana d.o.o.

Najveći opskrbljivač toplinske energije u gradu Karlovcu je Toplana d.o.o. [14]. Toplana d.o.o. društvo je s ograničenom odgovornošću za djelatnost opskrbe parom i vrelom vodom, u vlasništvu grada Karlovca. Izgrađena je i puštena u pogon 1966.g. kako bi grijala 190 stanova. Danas se preko toplane grije preko 7.600 stanova i 450 poslovnih prostora, a toplina se predaje u 180 toplinskih stanica [8].

Tablica 4 Specifikacije centraliziranog toplinskog sustava grada Karlovca

Podaci	Jedinica	2010.	2011.	2012.	2013.
	Ref.	[29]	[30]	[31]	[14]
Ukupan broj potrošača	-	8.140	8.271	8.050	8.094
Grijana površina – kućanstva	m ²	408.439	401.087	409.160	407.477
Grijana površina – ostali potrošači	m ²	123.757	120.442	105.071	102.078
Ukupna isporučena toplinska energija	MWh	82.320	87.022	66.249	66.281
Ukupna duljina distribucijske mreže	km	42	42	21	21
Gorivo	-	PP, LU, LUEL	PP, LU, LUEL	PP, LU, LUEL	PP, LU, LUEL

Do 2007.g. glavno gorivo za pogon bio je mazut. Ukupni toplinski učinak glavne kotlovnice iznosi 116 MW a raspodijeljen je na tri vrelovodna kotla kako je to prikazano u Tablici 5. Tadašnja duljina distribucijske mreže iznosila je 42 km, koja je nakon obnove 2012.g. smanjena na 21 km. 2007.g započeta je modernizacija i plinifikacija zastarjelih kotlova na mazut te je kotao VKLM50, snage 50 MW, priključen na plinsku mrežu. Time je proizvodnja toplinske energije u postrojenju postala učinkovitija, jeftinija i ekološki manje štetna po okoliš. U vlasništvu Toplane d.o.o. nalazi se i izdvojena kotlovnica toplinskog učina 1,4 MW, smještena u stambenom objektu na adresi Bašćinska cesta 41 i služi za grijanje tog stambenog bloka. Skladištenje mazuta je u dva spremnika zapremnine po 1.000 tona što znači mogućnost

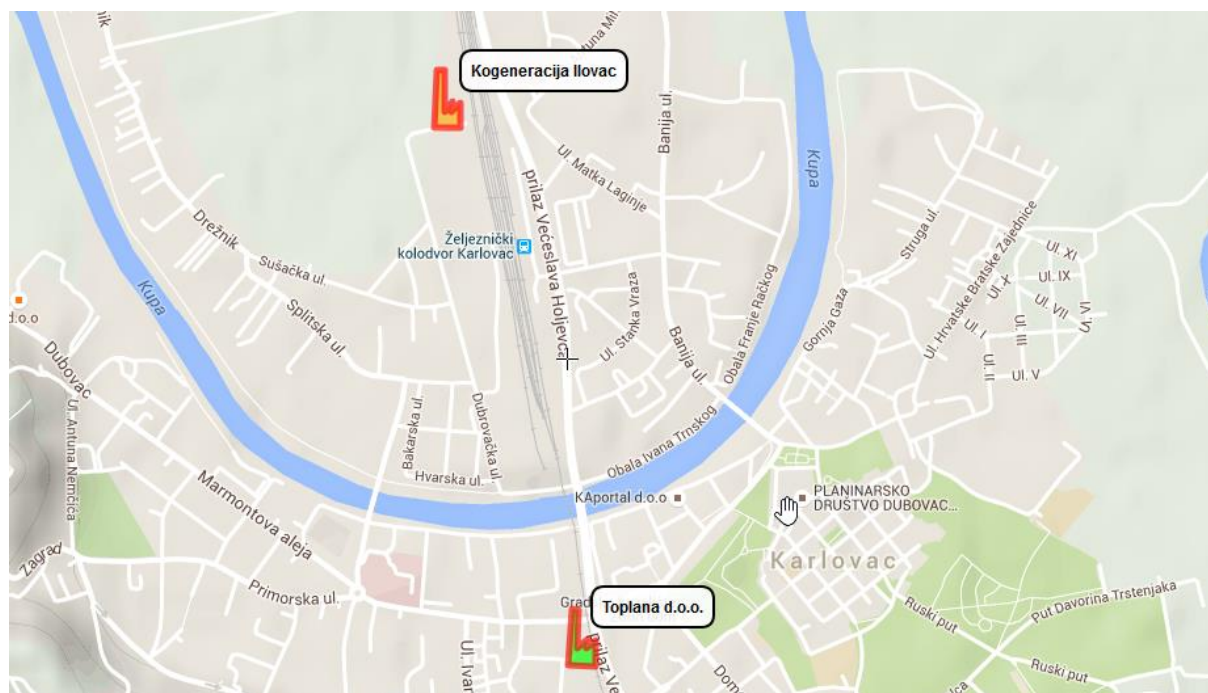
skladištenja od cca. 1/5 ukupne godišnje potrošnje mazuta [8]. U Tablica 4 prikazane su specifikacije postojećeg CTS-a grada Karlovca odnosno Toplane d.o.o. Vidljivo je da je da su svi parametri u blagom padu što je rezultat gašenja manjeg broja poslovnih objekata.

Tablica 5 Specifikacije poduzeća Toplane d.o.o. [8].

Jedinica	Snaga (MW)	Količina i tip	Gorivo	U pogonu od
Kotlovnica na mazut	116	3 Toplovodna kotla	Mazut/Loživo ulje	1966.
VKLM50	50	1 Toplovodni kotao	Prirodni plin	2007.
Izdvojena kotlovnica	1,4	1 Toplovodni kotao	Prirodni plin	2007.

Kogeneracija na biomasu Ilovac

U gradu Karlovcu planirana je izgradnja kogeneracijske jedinice na krutu biomasu koja bi trebala biti puštena u pogon 2017.g [8]. Projekt kogeneracije Ilovac zajednički je projekt grada Karlovca, Toplane d.o.o. i privatnih investitora. Izgradnja ove kogeneracije planirana je u gradskoj četvrti Dubovac udaljenoj 2 km od Toplane d.o.o. kako je to prikazano na Slici 3.



Slika 3. Lokacije kogeneracije na biomasu Ilovac i Toplane d.o.o.

Ovo postrojenje prvenstveno je namijenjeno za proizvodnju električne energije koja se prodaje na slobodnom tržištu, dok je otpadnu toplinu iz tog procesa moguće iskoristiti za grijanje prostora u postojećem CTS-u grada Karlovca. Snaga postrojenja je 5 MW električne

energije i 20 MW toplinske energije [32]. Sva toplinska energija koju kogeneracija Ilovac proizvede biti će otkupljena od strane Toplane d.o.o. koja će tu toplinsku energiju prodavati krajnjim korisnicima. Planirani rad ovog postrojenja je između 6000 i 8000 sati godišnje, gdje se pretpostavlja da će se ukupni stupanj djelovanja kretati između 61,4% u zimskom režimu rada i 40,3% u ljetnom režimu rada [32]. Ukupna potrošnja biomase (sječka) za 8000 sati rada procijenjen je na 66.160 tona [32].

4. MATEMATIČKI MODEL

Ovaj optimizacijski model je determinističke naravi, što znači da su poznati parametri poput satne toplinske potražnje mreže i satne cijene električne energije koja je egzogeno dodana u model. Poznate su i varijable poput cijene plina, efikasnosti, minimalne i maksimalne snage postrojenja i ostali troškovi koji su detaljnije razrađeni u poglavlju 4.2. Proizvodnja toplinske energije svakog toplinskog postrojenja na satnoj bazi, odnosno raspored rada CTS-a, strategija iskorištavanja toplinskog spremnika i troškovi goriva smatraju se glavnim varijablama na kojima se provodi optimizacija, a koje ujedno predstavljaju izlazne podatke optimizacijskog modela.

Za razvoj ovog modela korišten je optimizacijski program MATLAB koji se među ostalim koristi i za modeliranje linearnih i nelinearnih problema. MATLAB ima mogućnost provođenja optimizacije od jednostavnih školskih primjera pa sve do primjera iz stvarnoga života, uz istovremenu evaluaciju dobivenih rješenja [33]. Postoji niz rješavača koji su ugrađeni u MATLAB-ov optimizacijski paket poput: *linprog*, *quadprog*, *fmincon*, *fminsearch*, itd. [33]. U sklopu ovog diplomskog rada korišten je rješavač *fmincon* koji se koristi za optimiziranje ograničenih multivarijablinih nelinearnih problema.

4.1. Funkcija cilja

Cilj modela je minimizacija troškova proizvodnje toplinske energije koja se računa prema jednadžbi (5). Funkcija cilja sastoji se od nekoliko različitih varijabli poput cijene plina, cijene električne energije, korisnosti parnog kotla i toplinskog množitelja.

$$z = \sum_{t=1}^N \frac{c_{plin} \cdot \dot{Q}_{VR.KOT}(t)}{\eta(\dot{Q}_{VR.KOT}, t)} + \sum_{t=1}^N \frac{c_{ele}(t) \cdot \dot{Q}_{DT}(t)}{COP(\vartheta_v, t)} \quad (5)$$

Pri čemu je:

- z , funkcija cilja, (€),
- c_{plin} , cijena plina, (€/MWh),
- $\dot{Q}_{VR.KOT}(t)$, toplinska energija iz vrelovodnog kotla, (MWh),
- $\eta(\dot{Q}_{TOPL}, t)$, korisnost parnog kotla toplane, (-),
- $c_{ele}(t)$, cijena električne energije, (€/MWh),

- $\dot{Q}_{DT}(t)$, toplinska energija iz dizalice topline, (MWh),
- $COP(\vartheta_v, t)$, toplinski množitelj u funkciji vanjske temperature(-).

Prvi član jednadžbe (5) odnosi se na utrošak plina za proizvodnju toplinske energije u vrelovodnom kotlu, a drugi na utrošak električne energije za proizvodnju toplinske energije preko DT. Optimizacijske varijable, čija se optimalna rješenja traže u svakom vremenskom trenutku, su $\dot{Q}_{VR,KOT}(t)$ i $\dot{Q}_{DT}(t)$, a odnose se na toplinsku energiju proizvedenu iz vrelovodnog kotla odnosno DT.

4.2. Ograničenje vezano na količinu energije na ulazu u spremnik

Funkcija cilja određena ograničenjima vezanima za količinu energije na ulazu u spremnik, stupanj djelovanja vrelovodnog kotla, napunjenost toplinskog spremnika, rad DT i ostala ograničenja vezana za minimalne i maksimalne vrijednosti optimizacijskih varijabli. Jedno od tih ograničenja odnosi se na maksimalnu dozvoljenu količinu energije koja u jednom satu može biti pohranjena u toplinski spremnik. Prema jednadžbi (6) vidljivo je da zbroj svih energetske tokova na ulazu u spremnik mora biti manji ili jednak maksimalnom dozvoljenom, u ovom slučaju \dot{Q}_{\max_ulaz} čiji je iznos ograničen na 50% kapaciteta spremnika ili maksimalnu količinu energije koju vrelovodni kotao može predati u jednom satu.

$$\dot{Q}_{\max_ulaz} \geq \dot{Q}_{VR,KOT}(t) + \dot{Q}_{DT}(t) + \dot{Q}_{KOGEN}(\dot{Q}_{POTR}, t) \quad (6)$$

Pri čemu je:

- \dot{Q}_{\max_ulaz} , maksimalan energetski tok na ulazu u spremnik, (MWh),
- $\dot{Q}_{KOGEN}(\dot{Q}_{POTR}, t)$, toplinska energija iz kogeneracije na biomasu, (MWh),
- $\dot{Q}_{POTR}(\vartheta_v, t)$, satna toplinska potražnja iz mreže, (MWh).

U jednadžbi (6) prva dva člana $\dot{Q}_{VR,KOT}(t)$ i $\dot{Q}_{DT}(t)$ predstavljaju optimizacijske varijable, dok član $\dot{Q}_{KOGEN}(\dot{Q}_{POTR}, t)$ predstavlja toplinsku energiju iz kogeneracijskog postrojenja. Energija iz kogeneracijskog postrojenja ima mogućnost zadovoljavanja većeg djela potražnje iz toplinske mreže pa je tako toplinska energija iz kogeneracije, u svrhu pojednostavljenja, u ovom modelu izražena preko funkcijske ovisnosti o potražnji za toplinskom energijom \dot{Q}_{POTR} kako je to prikazano u izrazu (7).

$$\dot{Q}_{KOGEN}(\dot{Q}_{POTR}, t) = \begin{cases} \dot{Q}_{POTR}(\vartheta_v, t) \leq \dot{Q}_{KOGEN_{max}}, & \dot{Q}_{KOGEN}(t) = \dot{Q}_{POTR}(\vartheta_v, t) \\ \dot{Q}_{POTR}(\vartheta_v, t) > \dot{Q}_{KOGEN_{max}}, & \dot{Q}_{KOGEN}(t) = \dot{Q}_{KOGEN_{max}} \end{cases} \quad (7)$$

Pri čemu je:

- $\dot{Q}_{KOGEN_{max}}$, maksimalna količina toplinske energije na izlazu iz kogeneracije, (MWh)

Prema izrazu (7) vidljivo je da je toplinska energija iz kogeneracijskog postrojenja na biomasu jednaka potražnji za toplinskom energijom iz mreže ukoliko je ona manja ili jednaka maksimalnoj količini toplinske energije koju to postrojenje može isporučiti u jednom vremenskom trenutku $\dot{Q}_{KOGEN_{max}}$. U protivnom ona je jednaka maksimalnoj količini topline na izlazu iz kogeneracije.

4.3. Ograničenja vezana na stupanj djelovanja vrelovodnog kotla

Promjenjivi stupanj djelovanja vrelovodnog kotla glavni je uzrok nelinearnosti ovog optimizacijskog modela. Kako se u analiziranom slučaju radi o vrelovodnom kotlu s kliznim temperaturama medija, efikasnosti su najviše na najnižim opterećenjima iz razloga što su temperature dimnih plinova na najnižim opterećenjima najniže. Kako bi se što kvalitetnije opisao rad vrelovodnog kotla i njegova ovisnost o stupnju djelovanja pri različitim opterećenjima primijenjen je programski alat iz paketa MATLAB za prilagođavanje krivulja (eng. *cruve fitting*). Krivulja koja najbliže opisuje ovaj problem sigmoidnog je oblika, a funkcijska ovisnost stupnja djelovanja o opterećenju kotla dana je izrazom (8).

$$\eta(\dot{Q}_{VR.KOT}, t) = \frac{k_1}{\left(1 + k_2 \cdot e^{(k_3 - k_4 \cdot \dot{Q}_{VR.KOT}(t))}\right)} + k_5 \quad (8)$$

Pri čemu su:

- k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 , koeficijenti za određivanje stupnja djelovanja.

U izrazu (8) koeficijenti k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 s desne strane jednadžbe određuju pomak, amplitudu, nagibe i zakrivljenost krivulje u pojedinim točkama, dok $\dot{Q}_{VR.KOT}(t)$ i $\eta(\dot{Q}_{VR.KOT}, t)$ predstavljaju vrijednosti na x i y osi. Vidljivo je da je funkcija eksponencijalnog oblika zbog čega njezina vrijednost nikad ne može biti jednaka teoretski maksimalnoj vrijednosti stupnja djelovanja vrelovodnog kotla.

4.4. Ograničenja vezana za toplinski spremnik

Drugo ograničenje odnosi se na napunjenost toplinskog spremnika koja je izražena preko energetske bilance kako je to prikazano u izrazu (9), u kojem je vidljivo kako je napunjenost spremnika S u trenutku t jednaka zbroju napunjenosti spremnika u trenutku $t - 1$ i svih energetskih tokova na ulazu u spremnik, umanjena za energetski tok na izlazu iz spremnika, koji predstavlja potražnju iz mreže $\dot{Q}_{POTR}(t)$.

$$S(t) = S(t - 1) + \dot{Q}_{ULAZ}(t) - \dot{Q}_{POTR}(t) \quad (9)$$

Pri čemu je:

- $S(t)$, napunjenost spremnika u trenutku t , (MWh),
- $S(t - 1)$, napunjenost spremnika u trenutku $t - 1$, (MWh).

Toplinski tokovi na ulazu u spremnik jednaki su sumi toplinskih tokova iz vrelovodnog kotla $\dot{Q}_{VR.KOT}$, kogeneracije na biomasu \dot{Q}_{KOGEN} i DT \dot{Q}_{DT} kako je to prikazano u jednadžbi (10):

$$\dot{Q}_{ULAZ}(t) = \dot{Q}_{VR.KOT}(t) + \dot{Q}_{KOGEN}(t) + \dot{Q}_{DT}(t) \quad (10)$$

Napunjenost toplinskog spremnika također je ograničena i minimalnim i maksimalnim kapacitetom spremnika kako je to prikazano u izrazu (11), gdje se zbroj inicijalne napunjenosti spremnika S_0 i kumulativne sume svih toplinskih tokova, u trenucima od $t = 1$ do $t = N$, na ulazu u spremnik umanjen za kumulativnu sumu svih toplinskih tokova na izlazu iz spremnika, u trenucima od $t = 1$ do $t = N$, nalazi u intervalu između minimalne S_{min} i maksimalne napunjenosti spremnika S_{max} .

$$\begin{aligned} S_0(S_{max}) + \sum_{t=1}^N \dot{Q}_{ULAZ}(t) - \sum_{t=1}^N \dot{Q}_{POTR}(t) &\leq S_{max} \\ S_0(S_{max}) + \sum_{t=1}^N \dot{Q}_{ULAZ}(t) - \sum_{t=1}^N \dot{Q}_{POTR}(t) &\geq S_{min}(S_{max}) \end{aligned} \quad (11)$$

Pri čemu je:

- S_0 , početno stanje spremnika, (MWh),
- $\sum_{t=1}^N \dot{Q}_{ULAZ}(t)$, suma svih toplinskih tokova na ulazu u spremnik, (MWh),

- $\sum_{t=1}^N \dot{Q}_{POTR}(t)$, suma svih toplinskih tokova na izlazu iz spremnika, (MWh),
- S_{max} , maksimalna napunjenost spremnika, (MWh),
- S_{min} , minimalna napunjenost spremnika, (MWh).

Inicijalna i minimalna napunjenost spremnika u funkcijskoj su ovisnosti o maksimalnoj kako je to prikazano u izrazu (12). U tom izrazu koeficijenti ε_0 , ε_{min} predstavljaju njihove postotne vrijednosti inicijalnog trenutka i minimalnog kapaciteta spremnika.

$$\begin{aligned} S_0(S_{max}) &= \varepsilon_0 \cdot S_{max} \\ S_{min} &= \varepsilon_{min} \cdot S_{max} \end{aligned} \tag{12}$$

Pri čemu je:

- ε_0 , postotni udio inicijalne napunjenosti spremnika, (%),
- ε_{min} , postotni udio minimalne napunjenosti spremnika, (%).

Zbog prevelike količine varijabli, za slučaju provođenja optimizacije za cijelu sezonu grijanja, optimizacijski model je podijeljen na deset manjih vremenskih intervala koji se sastoje od po 504 vremenska trenutka. Kako bi se, zbog minimizacije troškova, izbjeglo potpuno pražnjenje spremnika u zadnjem vremenskom trenutku, čime iduća optimizacija u prvom vremenskom trenutku ne bi imala dovoljno energije, uvedeno je ograničenje iz izraza (13). Ovo ograničenje vezano je za napunjenost toplinskog spremnika u krajnjem trenutku koja mora biti jednaka napunjenosti spremnika u početnom trenutku, gdje je suma svih toplinskih tokova na ulazu u spremnik jednaka sumi svih toplinskih tokova na izlazu iz spremnika.

$$\sum_{t=1}^N \dot{Q}_{ULAZ}(t) = \sum_{t=1}^N \dot{Q}_{POTR}(t) \tag{13}$$

4.5. Ograničenje vezano za dizalicu topline

Učinak DT procjenjuje se preko faktora grijanja $COP(\vartheta_v, t)$, koji je u direktnoj vezi s vanjskom temperaturom. S obzirom da su poznate prosječne satne temperature zraka, te je u katalogima proizvođača DT lako pronaći ovisnost faktora grijanja o vanjskoj temperaturi za karakteristične temperature, linearnom interpolacijom određene su vrijednosti faktora hlađenja za svaki vremenski interval kako je to prikazano u jednadžbi (14):

$$COP(t) = COP_0 + \frac{\vartheta_v(t) - \vartheta_0}{\vartheta_1 - \vartheta_0} (COP_1 - COP_0) \quad (14)$$

Pri čemu je:

- COP_0 , tablična vrijednost faktora grijanja pri temperaturi ϑ_0 , (-),
- COP_1 , tablična vrijednost faktora grijanja pri temperaturi ϑ_1 , (-),
- ϑ_0 , tablična vrijednost temperature pri faktoru grijanja COP_0 , (°C),
- ϑ_1 , tablična vrijednost temperature pri faktoru grijanja COP_1 , (°C).

4.6. Ostala ograničenja

Uz gore navedena ograničenja koriste se i ograničenja koja se odnose na optimizacijske varijable $\dot{Q}_{VR.KOT}(t)$ i $\dot{Q}_{DT}(t)$. Ta ograničenja predstavljaju gornje i donje granice za iznose koje te varijable mogu poprimiti pa se tako prema jednadžbi (15) toplinska energija proizvedena u toplani i dizalici topline kreće u rasponima od 0 do $\dot{Q}_{VR.KOT_{max}}$ i $\dot{Q}_{DT_{min}}$.

$$\begin{aligned} 0 \leq \dot{Q}_{VR.KOT}(t) &\leq \dot{Q}_{VR.KOT_{max}} \\ 0 \leq \dot{Q}_{DT}(t) &\leq \dot{Q}_{DT_{max}} \end{aligned} \quad (15)$$

Pri čemu je:

- $\dot{Q}_{VR.KOT_{max}}$, maksimalna toplinska energija na izlazu iz vrelovodnog kotla, (MWh),
- $\dot{Q}_{DT_{max}}$, maksimalna toplinska energija na izlazu iz dizalice topline, (MWh).

Prema izrazu (16), maksimalne vrijednosti toplinskih tokova iz postrojenja definirane su umnoškom njihovih maksimalnih snaga i promatranog vremenskog perioda. Kako je optimizacijski model proveden na satnoj bazi, maksimalna vrijednost toplinskog toka jednaka je upravo maksimalnoj vrijednosti snage vrelovodnog kotla toplane $P_{VR.KOT_{max}}$ i DT $P_{DT_{max}}$.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{VR.KOT_{max}} &= P_{VR.KOT_{max}} \cdot \Delta t \\ \dot{Q}_{DT_{max}} &= P_{DT_{max}} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (16)$$

Pri čemu je:

- $P_{VR.KOT_{max}}$, maksimalna snaga vrelovodnog kotla toplane, (MW),
- $P_{DT_{max}}$, maksimalna snaga dizalice topline, (MW),
- Δt , promatrani vremenski interval, (h).

5. PRETPOSTAVKE, ULAZNI PODACI I SCENARIJI

Za provođenje ovog optimizacijskog modela te njegovu evaluaciju, potrebno je sakupiti veliku količinu podataka te uvesti nekoliko pretpostavki. U ovom poglavlju razmatraju se tri dijela gdje se u prvom govori o uvedenim pretpostavkama i pojednostavljenjima koja su nužna za rad optimizacijskog modela. U drugom dijelu opisani su korišteni podaci, izvori odakle su preuzeti, kako su obrađeni i transformirani u oblike koji su pogodni za što realniji opis sustava. U tom dijelu ukratko je opisana strategija vođenja postojećih kapaciteta za proizvodnju toplinske energije u CTS-u grada Karlovca. U trećem dijelu navedeni su scenariji koji su razvijeni i analizirani kako bi bilo moguće provesti evaluaciju optimizacijskog modela.

5.1. Pretpostavke i pojednostavljenja

Za slučajeve kada ne postoje dostupne informacije ili one nisu dovoljno precizne, odgovarajuće pretpostavke i pojednostavljenja mogu biti dovoljno točna za opis stvarnosti. Tako razvijeni optimizacijski model sadržava pretpostavke vezane za matematički model, rad i proizvodnju jedinica CTS-a.

Pretpostavke vezane za CTS

Prva pretpostavka vezana je za određivanje toplinske potražnje mreže CTS-a. Kako su na raspolaganju bili samo podaci za ukupnu godišnju isporučenu toplinu, te meteorološki podaci za grad Karlovac, metodom stupanj sat određena je satna potražnja za toplinskom energijom. Detaljniji opis određivanja toplinske potražnje prema [34] za grad Karlovac prikazan je u poglavlju 4.2.1.

Druga pretpostavka odnosi se na faktor grijanja za dizalicu topline. Kako su prema [35] na raspolaganju kataloški podaci ovisnosti faktora grijanja DT i vanjske temperature, linearnom interpolacijom, u svrhu pojednostavljenja modela, određene su vrijednosti faktora grijanja za svaki vremenski interval. Detaljniji opis ovog postupka nalazi se u poglavlju 3.1.5.

Treća pretpostavka odnosi se na učinkovitost vrelovodnog kotla. Kako je količina podataka za učinkovitost vrelovodnog kotla ograničena s četiri točke, te njegovom minimalnom i maksimalnom snagom na kojoj postrojenje radi, uvedena je aproksimativna krivulja koja uz relativno mala odstupanja opisuje tu ovisnost.

Pretpostavke vezane za toplinski spremnik

Slijedeća pretpostavka proizlazi iz ograničenja za toplinski spremnik. Kako je ovo optimizacijski model s velikim brojem varijabli, vrijeme provođenja procesa optimizacije raste eksponencijalno s porastom optimizacijskih varijabli. Uvođenjem još jedne optimizacijske varijable koja bi se odnosila na toplinski spremnik njihov broj bi porastao za jednu trećinu što bi znatno usporilo provedbu optimizacije [33]. Iz tog razloga gubici topline kroz stijenku toplinskog spremnika nisu uzeti u obzir. Kako je ovdje riječ o toplinskom spremniku relativno velikih dimenzija gubici topline, zbog manjeg omjera površine i volumena, manje su izraženi nego kod spremnika manjih kapaciteta, kod kojih je taj omjer, koji je proporcionalan s toplinskim gubicima, znatno veći [27]. Kako se u ovom modelu spremnik koristi za smanjenje vršnih opterećenja zadržavanje energije u njemu je kratkotrajno. Iz tog razloga gubici spremnika su zanemareni.

Pretpostavke vezane za cijene energenata

Ukupni troškovi goriva za proizvodnju toplinske energije su vrijednost na temelju koje se vodi optimizacija strategije vođenja analiziranog CTS-a. Kako bi se izračunao ukupan trošak proizvodnje toplinske energije, potreban je unos cijena energenata. U sklopu ovog diplomskog rada razmatrane su samo cijene električne energije i prirodnoga plina. Model ima mogućnost nadogradnje i ostalih troškova poput troškova rada i održavanja koji se lako dodaju u funkciju cilja.

Cijena plina za Termoelektranu Karlovac je prema ugovoru o sezonskoj nabavi prirodnoga plina konstantna za cijelu sezonu grijanja [36]. Kako bi model što realnije opisao stvaran rad postrojenja uzete su varijabilne cijene električne energije na satnoj bazi prema dva modela. U Modelu 1 cijene su preuzete s tržišta električnom energijom South Pool za 2014.g. [37], a u Modelu 2 cijene su preuzete iz dvotarifnog modela tvrtke HEP za poduzetništvo [38].

5.2. Ulazni podaci

Ulazni podaci odnose se na tehno-ekonomske karakteristike jedinica CTS-a poput vrste postrojenja, vrste i cijene goriva te efikasnosti, a prikazani su u Tablici 6. U Tablici 7 prikaz je minimalnih i maksimalnih snaga pri kojima je postrojenjima omogućen rad. Minimalna

snaga vrelovodnog kotla u toplani iznosi 7,5 MW, a maksimalna 50 MW, dok je ostalim postrojenjima u sklopu ovog rada omogućen rad pri svim snagama.

Tablica 6 Tehničke i ekonomske karakteristike jedinica za proizvodnju toplinske energije u CTS-u grada Karlovca.

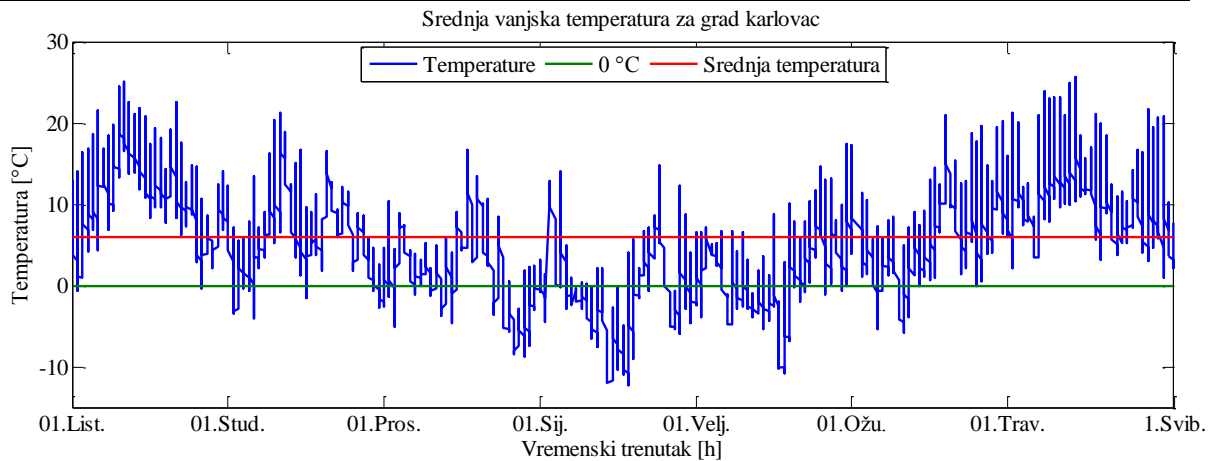
Vrsta postrojenja	Vrsta goriva	Cijena goriva €/MWh	Efikasnost / COP	Ref.
Toplana	Prirodni plin	37	0,93 – 0,955	[36]
Kogeneracija	Biomasa	-	-	[8],[32]
Dizalica topline	El. energija	South Pool / HEP	1,82 – 4,18	[35]

Tablica 7 Tehničke karakteristike jedinica za proizvodnju toplinske energije u CTS-u grada Karlovca.

Vrsta postrojenja	Minimalna snaga (MW)	Maksimalna snaga (MW)
Toplana	7,5	50
Kogeneracija	0	20
Dizalica topline	0	1 ili 4,5

Proračun toplinske potražnje za grad Karlovac

Satna potražnja za toplinskom energijom u gradu Karlovcu proračunata je metodom Stupanj-Sat prema [34]. U modelu su korišteni meteorološki podaci iz programa METEONORM [39] za prosječnu satnu vanjsku temperaturu u gradu Karlovcu te referentna projektna temperatura unutar grijanih objekata. Slika 4. Prikazuje srednju vanjsku temperaturu u gradu Karlovcu na satnoj razini za sezonu grijanja koja počinje 1.listopada a završava 30.travnja [36]. Vanjska projektna temperatura za grad Karlovac iznosi -18 °C, a unutarnja projektna temperatura prostorije 21 °C [40].



Slika 4. Prikaz variranja srednje vanjske temperature za grad Karlovac na satnoj razini

Stupanj sat računa se prema izrazu (17) a predstavlja razliku između unutrašnje temperature prostorije koja se grije i trenutne vanjske temperature [34]:

$$SS = \vartheta_p - \vartheta_v \quad (17)$$

Pri čemu je:

- SS – stupanj sat ($^{\circ}\text{C}$),
- ϑ_p – unutrašnja temperatura prostorije ($^{\circ}\text{C}$),
- ϑ_v – vanjska temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Izračun satnog toplinskog opterećenja metodom Stupanj-Sat dan je jednadžbom (18), a predstavlja potražnju za pojedini vremenski trenutak unutar sezone grijanja. Ukoliko je temperatura okoliša viša od 16°C potražnja je jednaka 0 [34].

$$STP = \left(\frac{\dot{Q}_{god}}{\sum_1^{5088} SS} \right) \cdot SS = \dot{Q}_{POTR} \quad (18)$$

Pri čemu je:

- STP – satno toplinsko opterećenje (MWh),
- \dot{Q}_{god} – ukupna isporučena toplinska energija za cijelu sezonu grijanja (MWh),
- $\sum_1^{5088} SS$ – zbroj svih SS tokom jedne sezone grijanja ($^{\circ}\text{C}$).

Postupak proračuna efektivnog broja radnih sati pri maksimalnoj snazi postrojenja

Za vrednovanje učinkovitosti rada i određivanje tipa postrojenja za proizvodnju toplinske energije važno je poznavanje efektivnog broja radnih sati pri maksimalnom opterećenju. Taj broj sati opisuje koliko je vremenskih intervala u jednoj sezoni postrojenje radilo na maksimalnoj snazi. Iz izraza (19) vidljivo je da je efektivan broj radnih sati pri maksimalnom opterećenju jednak omjeru ukupne godišnje isporučene energije i maksimalne snage postrojenja:

$$\tau_{ef} = \frac{\dot{Q}_{god_i}}{P_{max_i}} \quad (19)$$

Pri čemu je:

- τ_{ef} , efektivan broj radnih sati pri maksimalnom opterećenju, (h),
- \dot{Q}_{god_i} , ukupna godišnja isporučena toplinska energija iz postrojenja i , (MWh),
- P_{max_i} , maksimalna snaga postrojenja i , (MW).

U ovom radu ova varijabla koristi se radi lakše usporedbe rezultata jer omogućava točan prikaz rada postrojenja s obzirom na njegovu instaliranu snagu i broj sati rada.

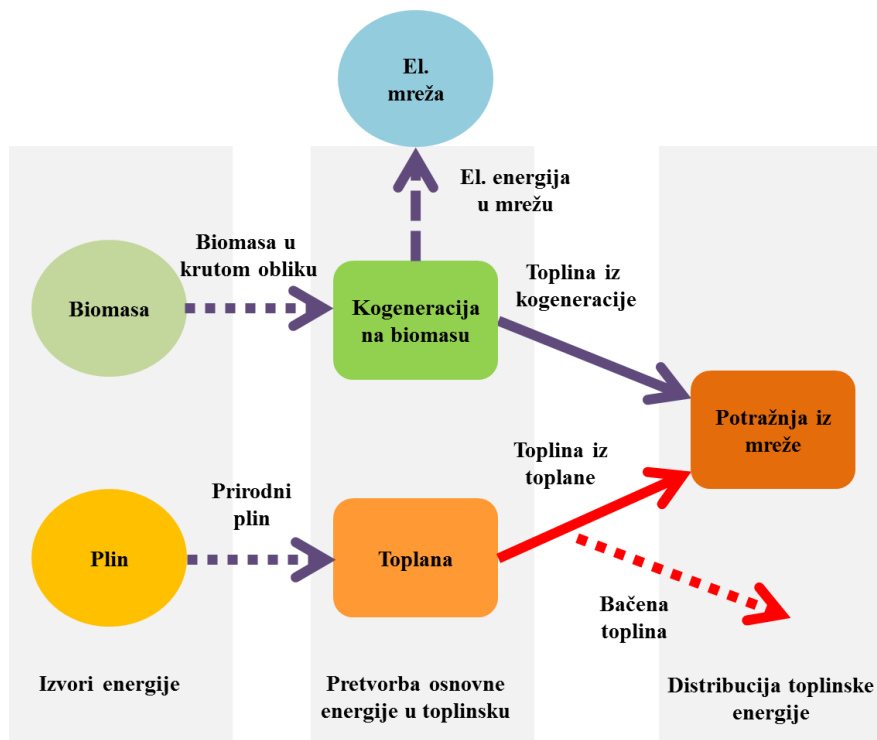
5.3. Analiza scenarija

Za analizu su odabrana tri scenarija gdje je Scenarij 1 referentni scenarij, Scenarij 2 opisuje ugradnju toplinskog spremnika, a Scenarij 3 ugradnju toplinskog spremnika i DT u sustav iz referentnog scenarija. U sva tri scenarija analiza je provedena za slučaj najveće godišnje toplinske potražnje grada Karlovca od 87.022 MWh koja je ostvarena u 2011.g. [41].

Scenarij 1 - Referentni scenarij

Referentni scenarij predstavlja CTS nakon izgradnje kogeneracijskog postrojenja na biomasu. Sustav se sastoji od novoizgrađene kogeneracije, postojeće toplane i mreže CTS-a, kako je to prikazano na Slici 5. Glavna ideja ovog scenarija je optimizacija rada vrelovodnog kotla koji je namijenjen za pokrivanje svih opterećenja koja nisu zadovoljena radom kogeneracije. Troškovi goriva koriste se kao referentna vrijednost za usporedbu s ostala dva scenarija kako bi se odredila eventualna ušteda za ekonomsku analizu. U ovom scenariju analizirane su i potencijalne uštede u gorivu s obzirom na višak proizvedene toplinske energije u pojedinim

vremenskim intervalima u kojima je potražnja iz mreže niža od tehničkog minimuma vrelovodnog kotla. U ovom scenariju višak te toplinske energije ispušta se u okoliš.



Slika 5 Shematski prikaz komponenti sustava za Scenarij 1.

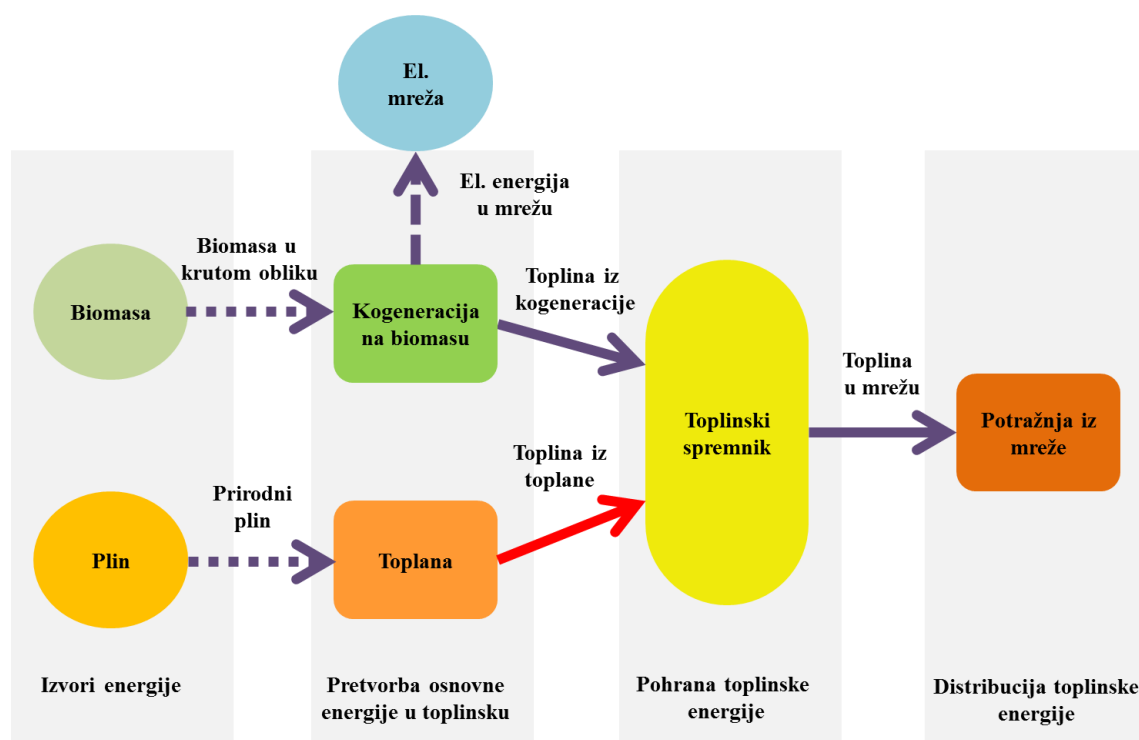
Scenarij 2 - Ugradnja toplinskog spremnika

Za razliku od referentnog scenarija, u Scenariju 2 glavnu komponentu sustava predstavlja toplinski spremnik. Cilj ugradnje toplinskog spremnika u CTS je smanjenje toplinskih gubitaka, koji nastaju uslijed ispuštanja viška proizvedene energije u okoliš. Na taj način troškovi koji proizlaze iz potrošnje goriva za pogon vrelovodnog kotla pri tehničkom minimumu su eliminirani. Na Slici 6 shematski je prikaz komponenti CTS-a koji se sastoji od kogeneracije, vrelovodnog kotla, toplinskog spremnika i mreže CTS-a.

Kako bi se ispitala valjanost optimizacijskog modela i potencijal za ostvarenje uštede, optimizacija je provedena na dva spremnika različitih kapaciteta, čiji su minimalni i maksimalni kapaciteti, te napunjenost u početnom i krajnjem vremenskom intervalu prikazani u Tablici 8. Slična analiza s istim vrijednostima provedena je i u Scenariju 2.

Tablica 8 Ulazni podaci vezani za analizirane kapacitete toplinskog spremnika.

Naziv	Minimalan kapacitet (MWh)	Maksimalan kapacitet (MWh)	Početno i krajnje stanje (MWh)
Spremnik 1	15	100	50
Spremnik 2	75	500	250

**Slika 6** Shematski prikaz komponenti sustava za Scenarij 2

Investicijski troškovi spremnika određeni su prema cijenama iz literature [6], a koje se ovisno o veličini spremnika kreću između 240 i 110 € po metru kubnom ekvivalenta vode kako je to prikazano u Tablici 10. Ukupni volumen spremnika 1 iznosi 1.667 m^3 , a specifična cijena po metru kubnom određena je linearnom interpolacijom i iznosi 196,67 €. Ukupni investicijski troškovi ovog spremnika iznose 327.777,78 €. Na isti način određeni su i investicijski troškovi spremnika 2 koji iznose 1.009.259,26 €. Svi tehno-ekonomski parametri koji se odnose na veličinu i investicijske troškove spremnika prikazani su u Tablici 9. Ovakvi investicijski troškovi i troškovi održavanja standardni su u svim provedenim analizama.

Tablica 9 Tehno-ekonomski parametri ugradnje spremnika

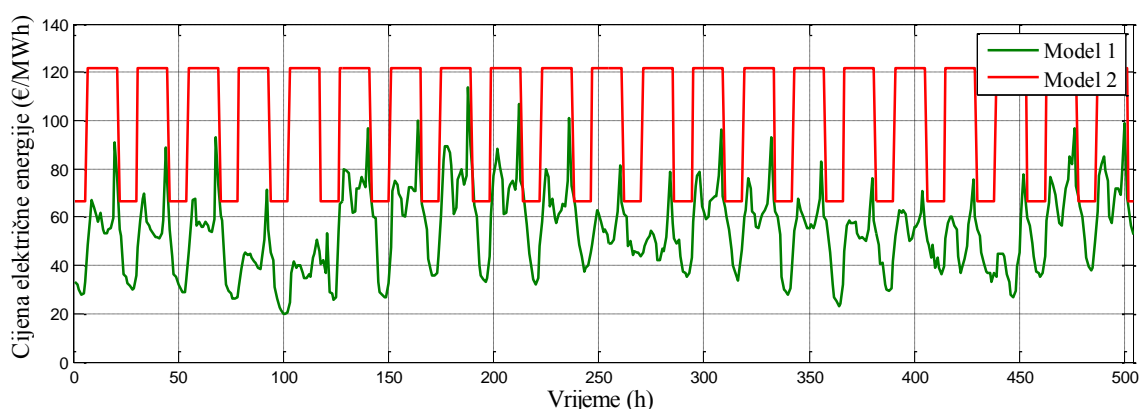
Naziv	Mjerna jedinica	Spremnik 1	Spremnik 2
Ovisnost kapaciteta i volumena	kWh/m ³	60	60
Kapacitet	MWh	100	500
Troškovi održavanja	€/god	1000	1000
Veličina spremnika	m ³	1.667	8.334
Specifični troškovi spremnika	€/m ³	196,67	121,11
Ukupni troškovi spremnika	€	327.777,78	1.009.259,26
Životni vijek	god	20	20

Tablica 10 Ovisnost specifične cijene i volumena spremnika

Volumen spremnika (m ³)	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Cijena (€/m ³)	240	175	160	150	110

Scenarij 3 - Ugradnja toplinskog spremnika i dizalice topline

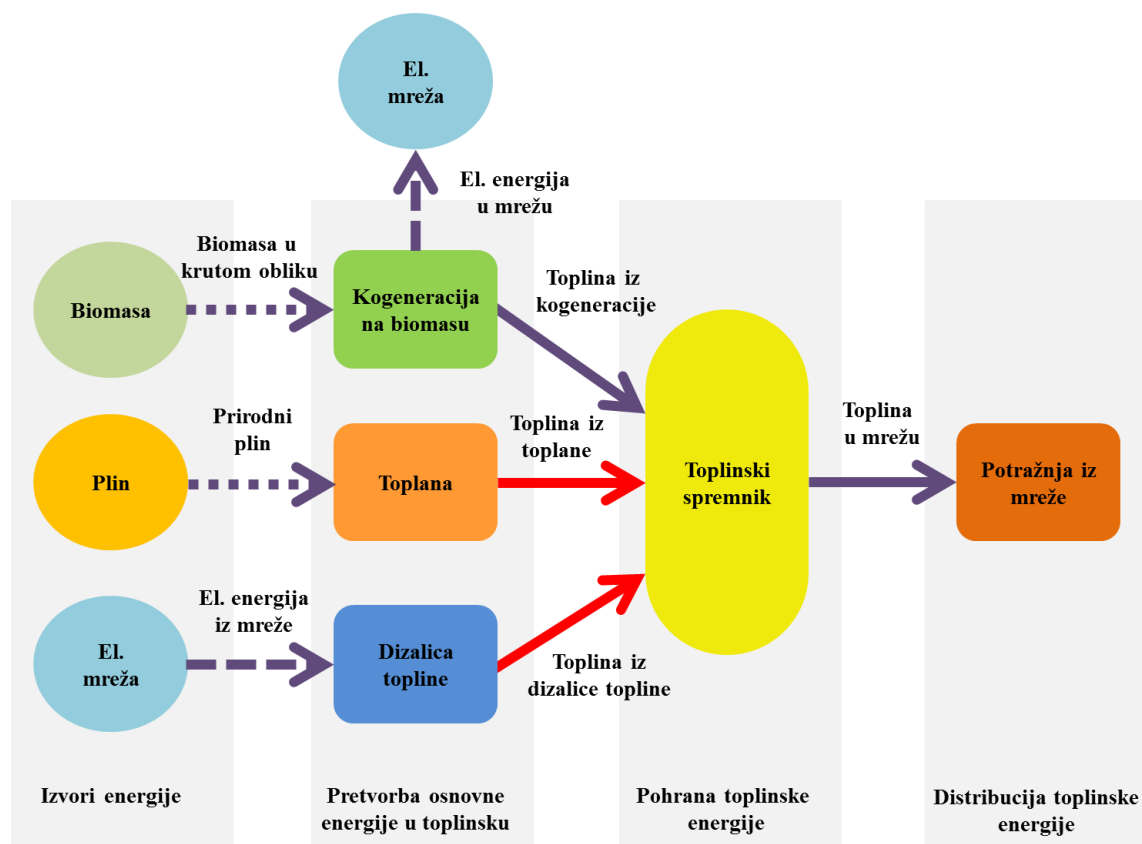
U ovom scenariju slično kao i u Scenariju 2 glavna komponenta sustava ponovo je toplinski spremnik. Jedina razlika je u konfiguraciji proizvodnog dijela CTS-a koji se sastoji od 3 jedinice: kogeneracije, vrelovodnog kotla i DT kako je to prikazano na Slici 8. Uloga DT u ovom scenariju je smanjenje troškova rada sustava i emisija CO₂. U dijagramu na Slici 7 nalazi se prikaz cijena električne energije prema dva ranije definirana modela. Na dijagramu su radi veće preglednosti prikazane samo satne cijene električne energije između 1. i 504. vremenskog intervala, no u ostatku modela princip određivanja cijena je isti.

**Slika 7 Prikaz distribucije cijena električne energije prema modelima 1 i 2 za dio sezone između 1. i 504. vremenskog intervala.**

Ovaj scenarij podijeljen je na dva slučaja, kako bi se ispitao potencijal za ostvarenjem ušteda i isplativost ugradnje pri različitim snagama DT. U Slučaju 1 provedene su dvije optimizacije prema ranije definiranim cijenama električne energije u modelima 1 i 2 za Dizalicu topline 1, snage 1 MW. Analogno tome u Slučaju 2 provedena je analiza za Dizalicu topline 2, snage 4,5 MW. Radi pojednostavljenja modela rad DT omogućen je u cijelom rasponu od 0 pa do 1 odnosno 4,5 MW. Prema katalogu kompanije Aquarea [35] faktor grijanja za DT u rasponu od 0,8 do 5 MW je približno jednak. Podaci koji se odnose na iznos faktora grijanja pri pojedinim vrijednostima vanjske temperature, zajedno s maksimalnom snagom prikazani su u Tablici 11, a kreću se između 1,73 pri -15 °C i 4,13 pri 25 °C .

Tablica 11 Prikaz ovisnosti faktora grijanja o temperaturi okoliša za analizirane dizalice topline.

COP	Temperatura okolišnog zraka					Snaga (MW)
	-15 °C	-7 °C	2 °C	7 °C	25 °C	
Dizalica topline 1	1,73	2,00	2,19	2,90	4,13	1
Dizalica topline 2						4,5



Slika 8 Shematski prikaz komponenti sustava za Scenarij 3

U Scenariju 3 sve ukupno je provedeno osam optimizacija, po četiri za svaki slučaj Scenarija, koje se odnose na različite kombinacije ulaznih parametara koji su prikazani u Tablici 12, a koji se odnose na snagu DT, veličinu spremnika i cijenu električne energije. Svaki slučaj podijeljen je u dva dijela koji se odnose na spremnike 1 i 2.

Tablica 12. Kombinacije za analizu različitih slučajeva ugradnje toplinskog spremnika i dizalice topline u CTS grada Karlovca.

Naziv		Dizalica topline 1	Dizalica topline 2	Spremnik 1	Spremnik 2	Model 1	Model 2
Slučaj 1	Prvi dio	+	-	+	-	+	-
		+	-	+	-	-	+
	Drugi dio	+	-	-	+	+	-
		+	-	-	+	-	+
Slučaj 2	Prvi dio	-	+	+	-	+	-
		-	+	+	-	-	+
	Drugi dio	-	+	-	+	+	-
		-	+	-	+	-	+

Investicijski troškovi dizalice topline preuzeti su iz literature [6], i kreću se između 0,52 i 0,84 milijuna eura po megawatu. Za proračun investicijskih troškova uzeta je srednja vrijednost. Troškovi održavanja također su uzeti kao srednja vrijednost između minimalnih i maksimalnih navedenih u literaturi i iznose 2.500 € godišnje, odnosno 1.500 € za svakih 10.000 sati rada. Svi tehno-ekonomski parametre prikazani su u Tablici 13.

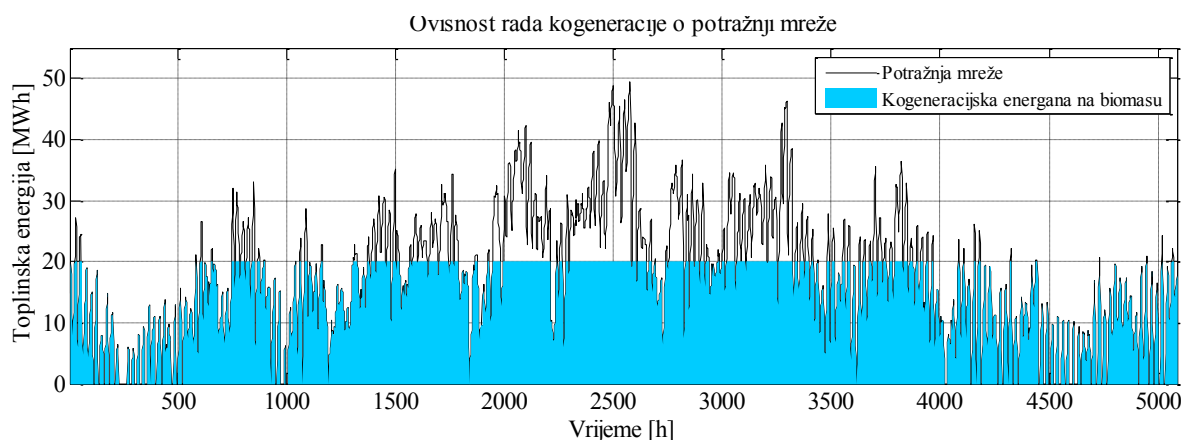
Tablica 13 Tehno-ekonomske karakteristike analiziranih dizalica topline

Veličina	Mjerna jedinica	Dizalica topline 1	Dizalica topline 2
Maksimalna toplinska snaga	MW	1	4,5
Raspon cijena	M€/MW	0,52 – 0,84	0,52 – 0,84
Investicijski troškovi po MWh	€/MW	680.000	680.000
Troškovi investicije	€	680.000,00	3.060.000,00
Raspon troškova održavanja	€/god	2.000 – 3.000	2.000 – 3.000
Održavanje	€/god	2.500	2.500
Održavanje nakon 10000 h	€/10000h	1.500	1.500
Vijek trajanja	god	20	20

6. REZULTATI ANALIZE

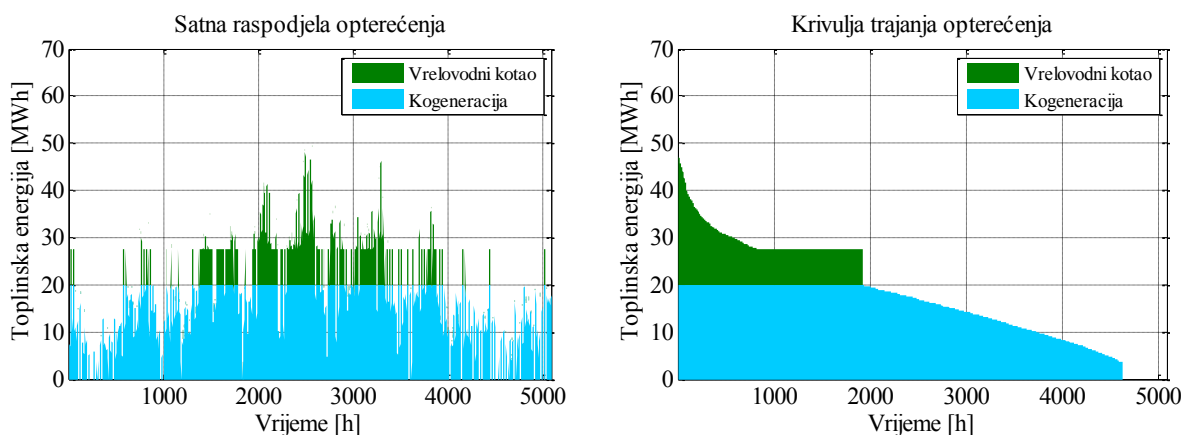
6.1. Scenarij 1 – Referentno stanje

U dijagramu na Slici 9 prikazana je ovisnost rada kogeneracije o toplinskoj potražnji mreže CTS-a. Aktivnost kogeneracije prisutna je gotovo u svim vremenskim intervalima, osim u onima kada je temperatura okoliša viša od 18 °C, tj. kada CTS ne proizvodi toplinsku energiju. Prema izračunu potražnje iz poglavlja 4.2., te maksimalnoj snazi kogeneracije u 1980 vremenskih intervala uz kogeneraciju je potreban i rad vrelovodnog kotla toplane.



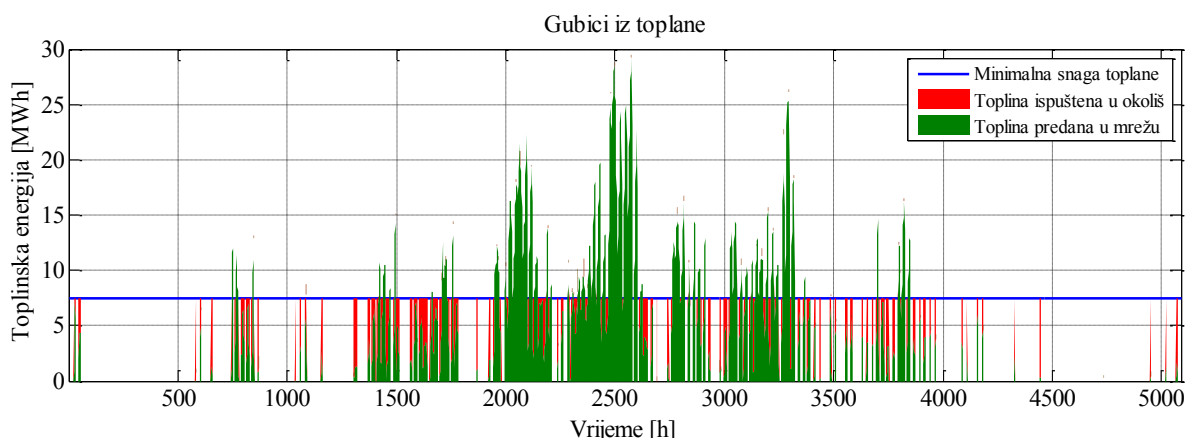
Slika 9 Prikaz ovisnosti rada kogeneracije na biomasu o potražnji iz mreže.

Iz dijagrama na Slici 10 vidljiva je satna raspodjela opterećenja, koja prikazuje količinu proizvedene energije u pojedinom vremenskom intervalu za svako postrojenje, i krivulja trajanja opterećenja koja zornije prikazuje rad postrojenja pri određenoj snazi. U ovom scenariju kogeneracija većinu vremena radi pri maksimalnoj snazi pa je efektivan broj sati rada relativno visok i iznosi 3605 sati, dok vrelovodni kotao većinu vremena radi na tehničkom minimumu, odnosno njegov efektivan broj sati rada iznosi 383,3 sata.



Slika 10 Satna raspodjela i krivulja trajanja opterećenja u referentnom scenariju

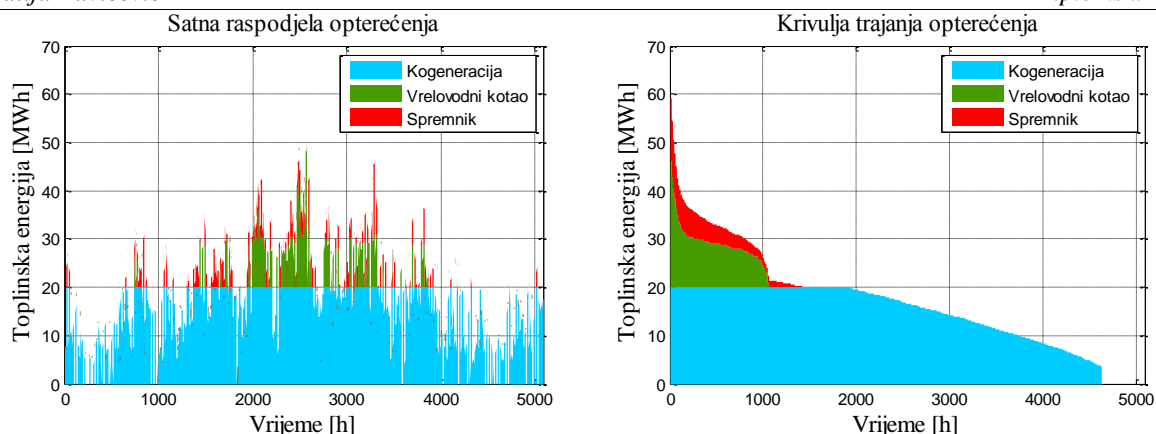
Na Slici 11 plavom linijom označen je tehnički minimum vrelovodnog kotla zbog kojeg je svaki vremenski interval, u kojemu je potražnja mreže niža, rad postrojenja ograničen na tu snagu. Zbog pojednostavljenja modela analiziranom CTS-u zanemarena je mogućnost akumulacije toplinske energije, te se višak ispušta u okoliš. Taj višak energije označen je crvenom bojom i predstavlja toplinske gubitke. Ukupna toplinska energija proizvedena u toplani u ovom scenariju iznosi 19.166,27 MWh, od čega na gubitke toplinske energije otpada 4.244,32 MWh. Tako se gotovo 22,15% ukupno proizvedene energije u vrelovodnom kotlu ispušta u okoliš, a ukupni troškovi goriva iznose 765.350 €. Potencijalna ušteda koju je moguće ostvariti samo eliminacijom toplinskih gubitaka kreće se oko 170.000 €.



Slika 11 Gubici topline nastali uslijed ispuštanja viška proizvedene topline u okoliš.

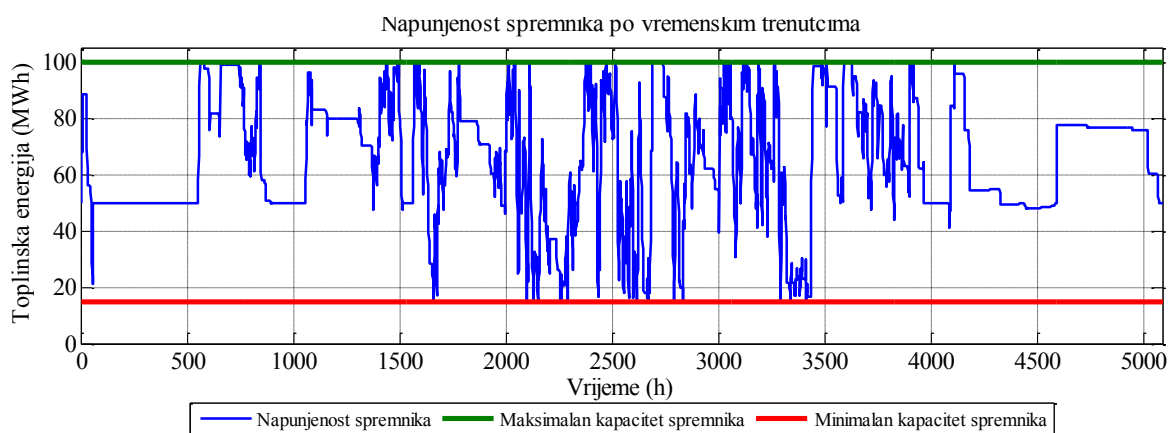
6.2. Scenarij 2 – Ugradnja toplinskog spremnika

Dijagram na Slici 12 prikazuje satnu raspodjelu i krivulju trajanja opterećenja za Scenarij 1. Iz lijeve slike vidljivo je kako je toplana osjetno manji broj sati u pogonu u odnosu na referentni scenarij kada je radila u svim vremenskim trenucima u kojima je potražnja iz mreže bila veća od 20 MWh. Iz ovoga je vidljivo kako je ugradnjom toplinskog spremnika u CTS moguće izbjeći ispuštanje toplinske energije u okoliš jer je sva proizvedena energija iz proizvodnih jedinica CTS-a isporučena u mrežu. Krivulja trajanja opterećenja pokazuje kako je u ovome slučaju vrelovodnom kotlu potreban znatno manji broj sati rada za zadovoljavanje potražnje iz mreže jer su svi viškovi pohranjeni u spremnik iz kojeg se također zadovoljava potražnja. Broj efektivnih radnih sati pri maksimalnoj snazi vrelovodnog kotla sada iznosi 298,4 h što je gotovo 22,15 % manje u odnosu na referentni scenarij. Odnosno umanjeno je za gubitke nastale prilikom ispuštanja viška toplinske energije u okoliš.



Slika 12 Satna raspodjela i krivulja trajanja opterećenja za Scenarij 1.

Dijagram na Slici 13 prikazuje je razinu napunjenosti spremnika za cijelu sezonu grijanja. Crvenom bojom označen je minimalan a zelenom maksimalan kapacitet spremnika. Plava krivulja predstavlja razinu napunjenosti u pojedinim vremenskim intervalima. Prema optimizacijskom modelu razina spremnika u početnom i krajnjem vremenskom trenutku, za sve analizirane scenarije u kojima se pojavljuje toplinski spremnik, iznosi 50% njegovog kapaciteta. Kretanjem krivulje napunjenosti spremnika unutar tih granica verificiran je optimizacijski model.



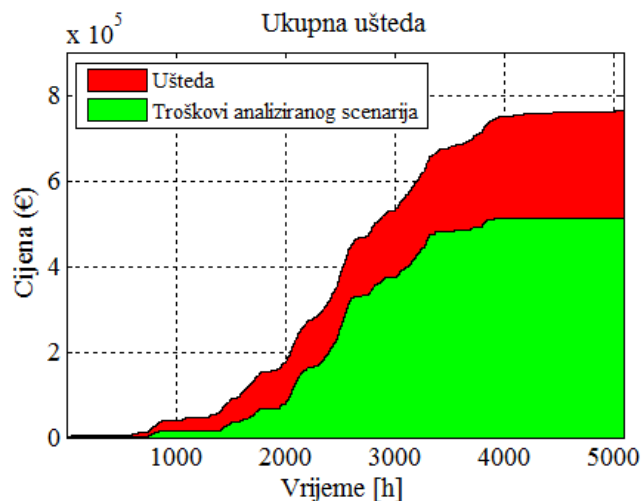
Slika 13 Prikaz razine napunjenosti spremnika 1 za cijelu sezonu grijanja.

Tehno-ekonomska analiza

U oba slučaja u kojima je analizirana ugradnja toplinskih Spremnika 1 i 2 ušteda je gotovo jednaka. Razlog tome je izbjegavanje ispuštanja viška proizvedene toplinske energije u okoliš kroz akumulaciju u spremniku.

Na Slici 14 nalazi se dijagram ukupne ostvarene uštede na kojem je crvenom bojom označena površina koja označava uštedu koja proizlazi iz razlike između troškova u referentnom

scenariju i troškova u analiziranom scenariju. Ta ušteda korištena je u tehno-ekonomskoj analizi kao prihod koji toplana ostvari na godišnjoj razini.



Slika 14 Akumulacija ukupnih troškova tokom cijele sezone i ukupna ušteda ostvarena s obzirom na referentni scenarij.

Ukupni troškovi goriva u referentnom scenariju iznose 765.350 €, a u ovome scenariju 574.110 €. Razlika tih dvaju troškova označava ostvarenu uštedu i na razini cijele sezone ona iznosi 182.240 €, što je jednako smanjenju od 23,81 %. U Tablici 14 prikazani su tehnički parametri rada vrelovodnog kotla u Toplani d.o.o. za Scenarij 1, a koji se odnose na ukupnu utrošenu količinu goriva, isporučenu toplinsku energiju, prosječnu učinkovitost, te broj sati koliko je postrojenje bilo u pogonu pri maksimalnoj snazi.

Tablica 14 Prikaz tehničkih parametara rada vrelovodnog kotla za Scenarij 1.

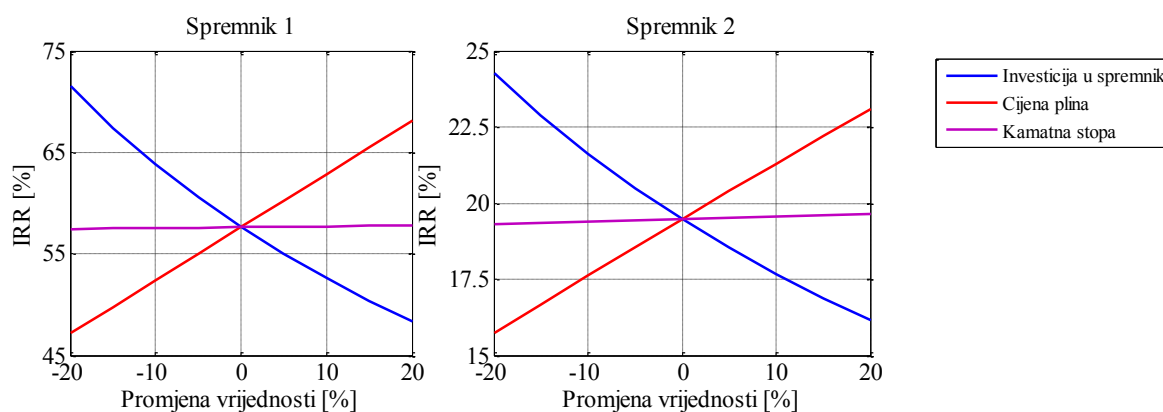
Naziv	Spremnik 1	Spremnik 2
Utrošeno gorivo (MWh/g)	15.760	15.730
Isporučena toplinska energija (MWh/g)	14.922	14.922
Prosječna učinkovitost (%)	94,68	94,86
Sati u pogonu pri maksimalnoj snazi (h)	298,4	298,4

Rezultati ekonomskih analiza scenarija 2 prikazani su u Tablici 26 i Tablici 27 koje su na kraju ovog rada dodane kao prilog. U tim tablicama prikazan i su financijski i ekonomski tokovi novca u kojima su prikazani svi parametri potrebni za određivanje NPV-a (Neto sadašnje vrijednosti) i IRR-a (unutarnje stope povrata) analiziranog scenarija. U svim analiziranim scenarijima udio vlastitih sredstava iznosi 15 % ukupne investicije, a ostatak

troškova pokriven je kreditom s kamatnom stopom u iznosu od 5 % koji je uzet na 15 godina. Ukupni investicijski troškovi za Spremnik 1 iznose 327.777,78 €, od čega na kredit otpada 278.611,11 €. Rata kredita iznosi 26.842,03 €, a ukupni troškovi u analizi sastoje se samo od troškova održavanja spremnika i iznose 1.000 € na godinu. Ušteda u gorivu iznosi 243.196,34 € godišnje. NPV ovog projekta iznosi 1.914.808,89 €, IRR 57,63 % a period povrata je 1,73 godine. Ukupni investicijski troškovi Spremnika 2 iznose 1.009.259,26 € od čega su 151.388,89 € vlastita sredstva. Rata kredita iznosi 82.649,19 €. U ovom slučaju ušteda u gorivu iznosi 243.196,34 €. NPV ovog projekta iznosi 1.413.495,33 €, IRR 19,47 % a period povrata 4,95 godina. Detaljne analize svih rezultata nalaze se u prilogu.

Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti provedena je za četiri parametra čiji je utjecaj na ekonomsku opravdanost projekta značajan. Analizirani su investicijski troškovi ugradnje toplinskog spremnika, cijene plina i kamatna stopa kredita. Analiza osjetljivosti provedena je na način da su cijene svih navedenih parametara uvećane i umanjene za 5, 10, 15 i 20%, te je grafički prikazan njihov utjecaj na isplativost projekta. Na Slici 15 grafički su prikazani rezultati analize osjetljivosti, pri čemu je vidljivo da najveći utjecaj na ekonomsku isplativost projekta imaju investicijski troškovi toplinskog spremnika, kod kojih se iznos IRR-a kreće između 47 i 71%, i cijena plina, dok kamatna stopa kredita nije toliko presudna.



Slika 15 Analiza osjetljivosti za Scenarij 1 pri ugradnji dva različita spremnika.

U Tablici 15 prikazani su rezultati analize osjetljivosti koja je provedena za najpovoljnije i najnepovoljnije uvjete u kojima su svi prethodno navedeni parametri uvećani, odnosno umanjene za 20% ovisno o njihovom utjecaju na iznos NPV-a i IRR-a. Takva analiza provedena je u svim analiziranim scenarijima.

Tablica 15 Minimum i maksimum vrijednosti NPV-a i IRR-a za Scenarij 1.

Naziv	Spremnik 1		Spremnik 2	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
NPV	1.283.859,84 €	2.656.079,07 €	687.253,72 €	2.252.072,95 €
IRR	39,22 %	85,23 %	12,84%	28,77%
PP (god.)	2,31	1,54	6,87	3,48

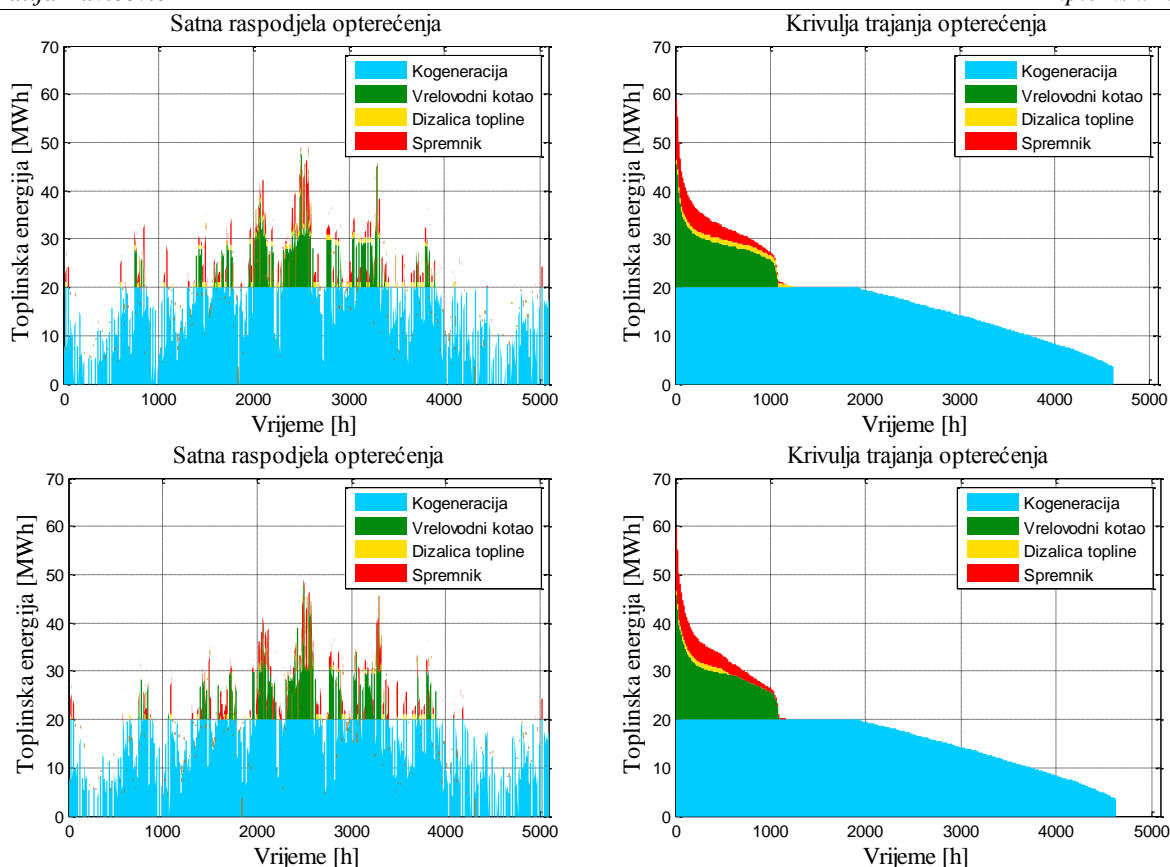
6.3. Scenarij 3 – Ugradnja toplinskog spremnika i dizalice topline

6.3.1. Slučaj 1 - Dizalica topline snage 1MW

Slučaj 1 prikazuje ugradnju DT snage 1MW u CTS, a sastoji se od dva dijela. U prvom dijelu prikazani su rezultati koji se odnose na ugradnju DT u kombinaciji sa Spremnikom 1, a u drugom dijelu su prikazani rezultati koji se odnose na ugradnju DT u kombinaciji sa Spremnikom 2. U svakom od tih dijelova prikazani su rezultati dviju optimizacija s dva različita modela cijene električne energije.

Prvi dio – Spremnik kapaciteta 100 MWh

Na Slici 16 prikazani su dijagrami sa satnim raspodjelama i krivuljama trajanja opterećenja za slučaj ugradnje DT snage 1 MW i toplinskog spremnika kapaciteta 100 MWh u CTS. Gornja dva dijagrama odnose se na cijene električne energije prema Modelu 1, a donja dva na cijene električne energije prema Modelu 2. Na dijagramima je vidljivo koja postrojenja u kojem vremenskom trenutku zadovoljavaju potražnju iz mreže. Prednost pri isporuci prema pretpostavkama modela prvo ima kogeneracija nakon koje slijede vrelovodni kotao i DT. Na samome se kraju energija pohranjena u toplinskom spremniku isporučuje u mrežu CTS-a. Iz Tablice 16 je vidljivo da je DT, u slučaju cijena prema Modelu 1, radila 2.947 sati, dok je u slučaju cijena prema Modelu 2, njezin broj sati rada bio gotovo dvostruko manji i iznosi 1.473 sati. Razlog tome je niska cijena električne energije noću kada je faktor grijanja, zbog nižih temperatura okoliša, nizak. Tako cijena toplinske energije, proizvedene u dizalici topline, često bude viša od cijene toplinske energije proizvedene u vrelovodnom kotlu. U slučaju varijabilne cijene iz Modela 1 dizalici topline omogućen je rad pri najvišim iznosima faktora grijanja, jer tokom dana često postoje nagli padovi cijene električne energije.



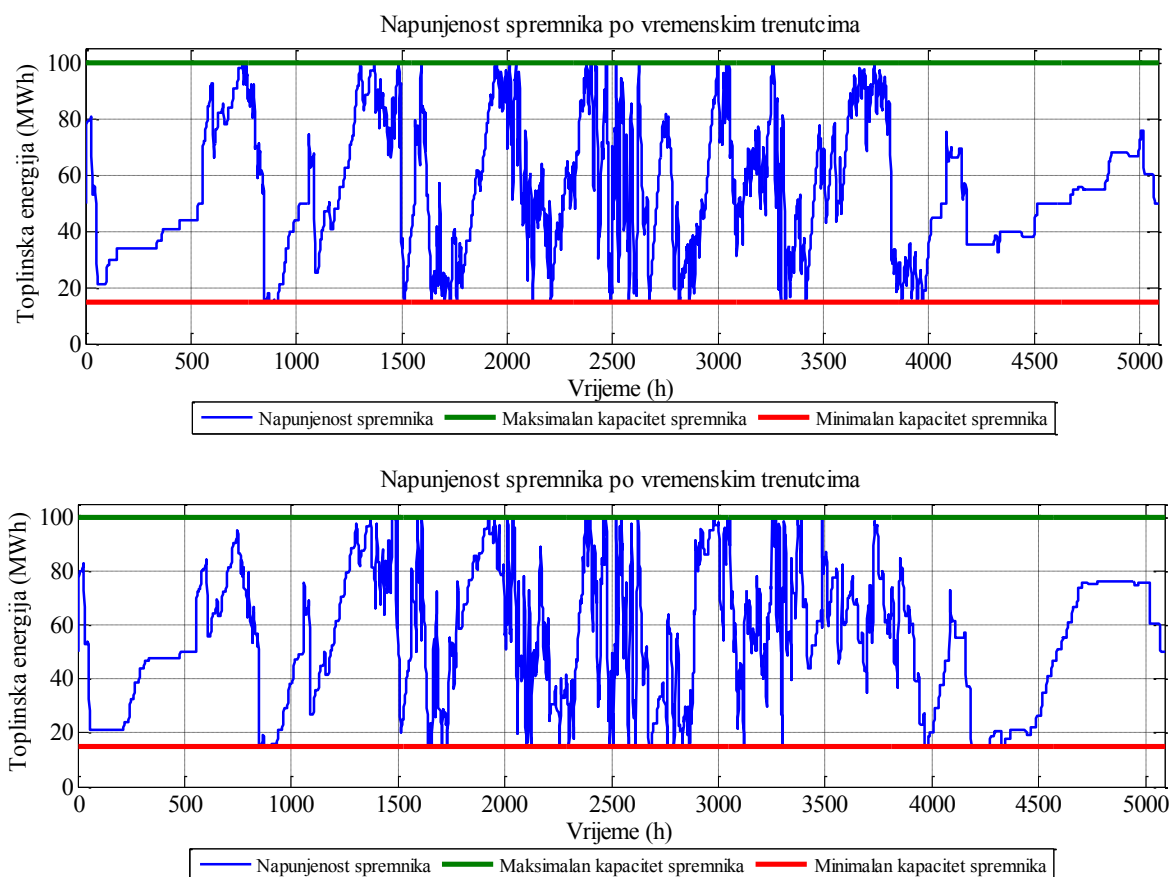
Slika 16 Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja za spremnik kapaciteta 100 MWh pri različitim cijenama el. energije.

Prema Tablici 16 u slučaju Modela 1 efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju za DT iznosi 2.902,3 sati, dok za vrelovodni kotao iznosi 240,1 sat, odnosno on služi za pokrivanje vršnih opterećenja. DT 98,48 % vremena, a vrelovodni kotao 21,76 % vremena koje je u pogonu radi pri maksimalnoj snazi. U slučaju Modela 2, efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju za dizalicu topline iznosi 1.416,6 sati, dok za vrelovodni kotao iznosi 270,1 sat, odnosno on ponovno služi za pokrivanje vršnih opterećenja. U ovom slučaju DT 96,17 % vremena, a vrelovodni kotao 23,46 % vremena koje je u pogonu radi pri maksimalnoj snazi.

Tablica 16 Aktivnost dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju

Naziv	Dizalica topline 1 MW			Vrelovodni kotao		
	Aktivnost	τ_{ef}	η_{ef}	Aktivnost	τ_{ef}	η_{ef}
Model 1	2.947	2.902,3	98,48 %	1103	240,1	21,76 %
Model 2	1.473	1.416,6	96,17 %	1151	270,1	23,46 %

Na dijagramima iz Slike 17 prikazane su razine napunjenosti spremnika za cijelu sezonu grijanja. Gornji dijagram odnosi se na cijene prema Modelu 1, a donji na cijene prema Modelu 2. Ponovo je vidljivo da se provedena optimizacija kreće unutar granica za minimalnu i maksimalnu napunjenost spremnika. U ovom slučaju minimalna napunjenost spremnika ograničena je na 15 MWh, a maksimalna predstavlja maksimalan kapacitet spremnika i iznosi 100 MWh. Također je vidljivo da su napunjenosti spremnika na početku i na kraju sezone jednake, čime je ponovno verificiran ispravan rad optimizacijskog modela.

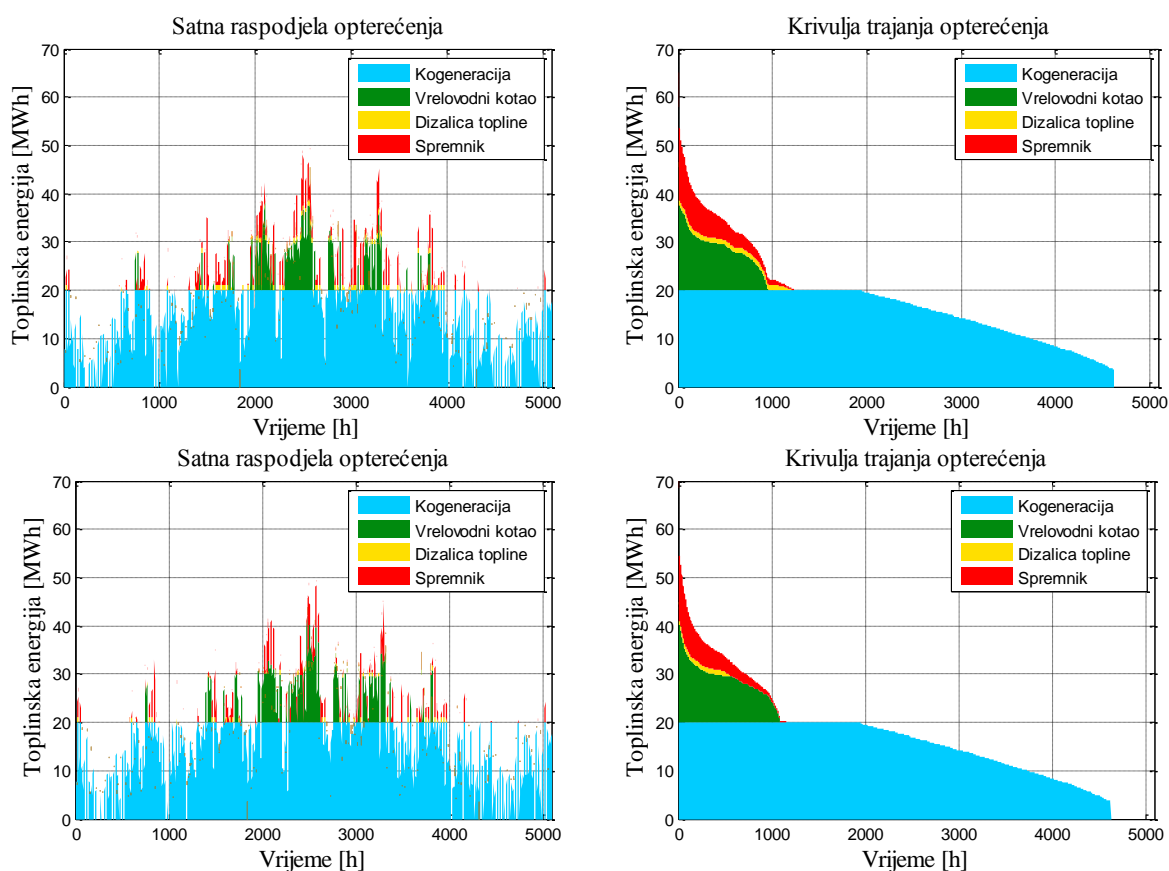


Slika 17 Napunjenosti spremnika kapaciteta 100 MWh pri različitim cijenama el. energije.

Drugi dio – Spremnik kapaciteta 500 MWh

Dijagrami na Slici 18 prikazuju satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja za spremnik kapaciteta 500 MWh. Gornji dijagrami odnose se na cijene električne energije prema Modelu 1, a donje dvije prema Modelu 2. Iz ovih je dijagrama ponovno vidljivo kako se zadovoljava potražnja iz pojedinih postrojenja u svakom vremenskom trenutku, odnosno koliko je toplinske energije iz pojedinog postrojenja isporučeno u mrežu CTS-a. Iz Tablice 14 vidljivo je da je rad DT prema cijenama električne energije iz Modela 1 zabilježen u 3.256 vremenskih

intervala, dok je rad vrelovodnog kotla zabilježen u svega 1007 vremenskih intervala. Za razliku od prvog dijela, u ovom dijelu kapacitet spremnika je pet puta veći. To dizalici topline daje dodatan prostor za rad u vremenskim trenucima u kojima joj je u prvom dijelu, zbog maksimalne napunjenosti spremnika, rad bio onemogućen. Rad DT prema Modelu 2 zabilježen je u 1.450 vremenskih trenutaka, dok je rad vrelovodnog kotla zabilježena 1140 vremenskih trenutaka. Razlika u broju sati rada između prvog i drugog dijela je jako mala zbog čega se može zaključiti da je prema modelu s ovakvim ulaznim podacima za DT postignut njihov maksimum. Zbog manjeg kapaciteta Spremnika 1 u prvom dijelu fleksibilnost sustava je manja, pa je zato i broj radnih sati DT manji.



Slika 18 Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja za spremnik kapaciteta 500 MWh pri različitim cijenama el. energije.

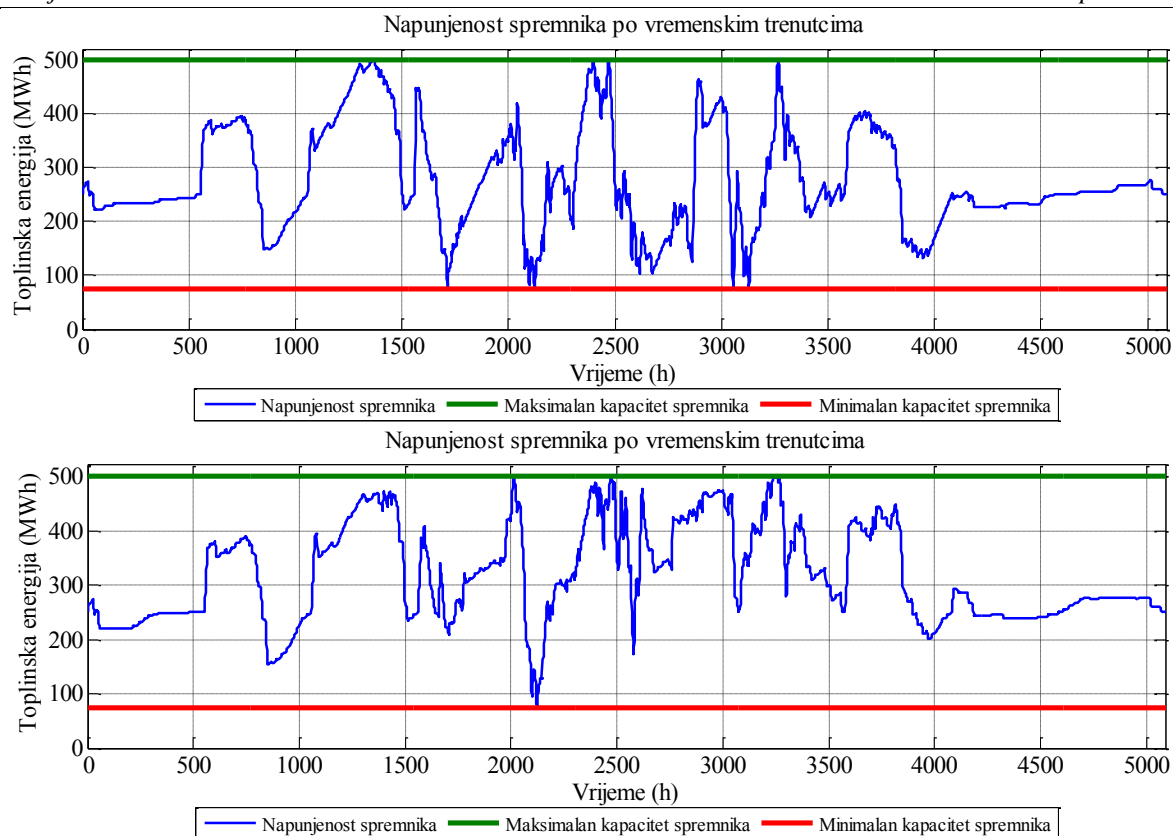
Prema Tablica 17 efektivan broj sati pri maksimalnoj snazi, prema Modelu 1, iznosi 3.202,8 sati DT i 234,4 sati za vrelovodni kotao. Osim više radnih sati DT, u odnosu na onu iz prvog dijela, udio sati pri maksimalnoj snazi gotovo je jednak i iznosi 98,36 %, dok je onaj vrelovodnog kotla porastao na 23,28 %. Prema Modelu 2 efektivan broj sati pri maksimalnoj snazi DT iznosi 1.439 sati i 296,7 sati za vrelovodni kotao. U ovom slučaju većim

kapacitetom spremnika omogućen je rad DT pri maksimalnoj snazi 99,24 % vremena što je porast u odnosu na manji spremnik iz prvog dijela.

Tablica 17. Vrijeme rada dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnoj snazi

Naziv	Dizalica topline 1 MW			Vrelovodni kotao		
	Vrijeme rada (h)	τ_{ef} (h)	η_{ef}	Vrijeme rada (h)	τ_{ef} (h)	η_{ef}
Model 1	3.256	3.202,8	98,36 %	1007	234,4	23,28 %
Model 2	1.450	1.439,0	99,24 %	1140	269.7	23,65 %

Na Slici 19 grafički je prikazana napunjenost spremnika. Gornja slika predstavlja napunjenost spremnika prema Modelu 1, dok donja slika predstavlja napunjenost spremnika prema Modelu 2. Zbog spremnika većeg kapaciteta u ovom dijelu oscilacije prilikom napunjenosti su manje izražene od onih iz prvog dijela. Napunjenost spremnika, kao i njegove granice minimalnog i maksimalnog kapaciteta određene su slično kao i u prvom dijelu, pa je tako maksimalan kapacitet spremnika 500 MWh, minimalan kapacitet 75 MWh a početna i krajnja napunjenost iznose 250 MWh.

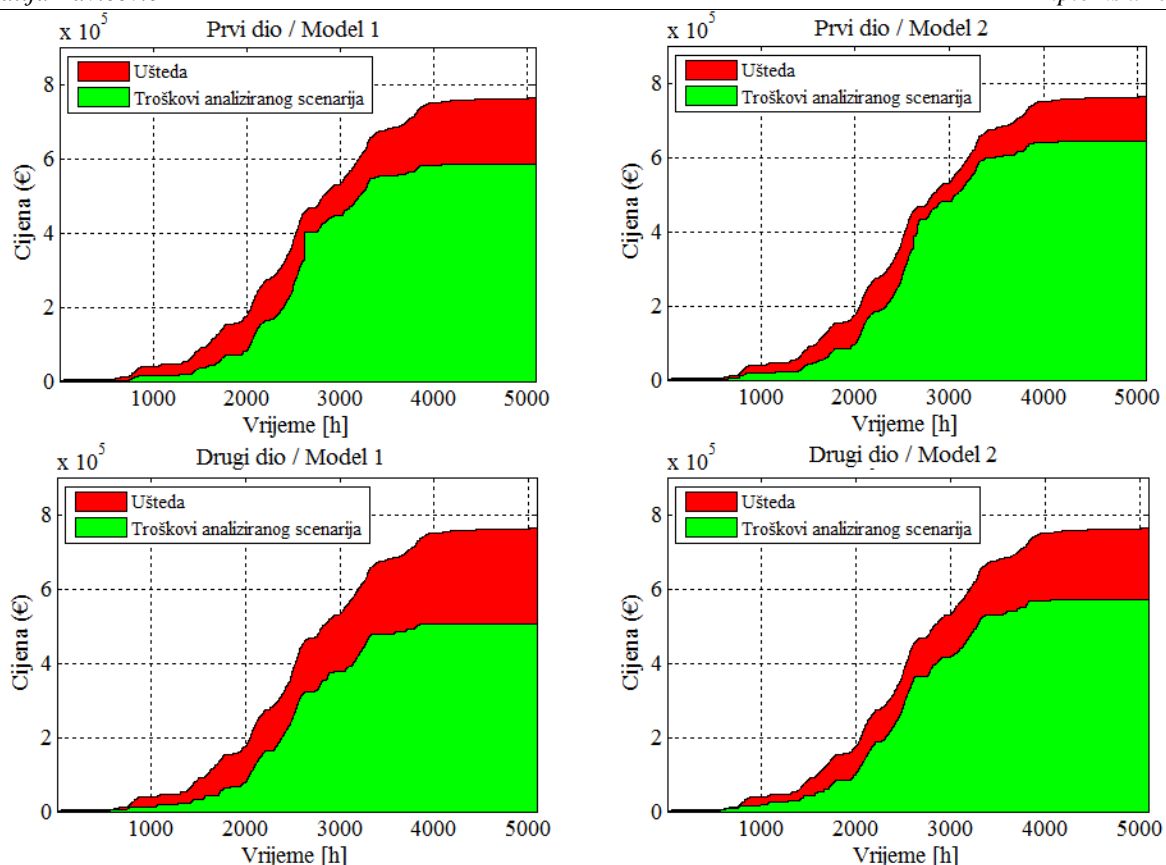


Slika 19 Napunjenosti spremnika kapaciteta 500 MWh pri različitim cijenama el. energije.

Tehno-ekonomska analiza

Uštede u ovom slučaju Scenarija 3 odnose se na manju potrošnju goriva u vrelovodnom kotlu uslijed rada DT, te izbjegavanja proizvodnje viška toplinske energije koja se ispušta u okoliš, kako je to slučaj u referentnom scenariju.

Dijagrami na Slici 20 prikazuju akumulaciju troškova za cijelu sezonu grijanja. Zelenom bojom označeni su ukupni troškovi goriva na kraju sezone prema pojedinom modelu analiziranog scenarija, dok je crvenom bojom označena ušteda, koja proizlazi iz razlike troškova referentnog scenarija i analiziranih slučajeva. Gornja dva dijagrama odnose se na optimizacije provedene prema modelima iz prvog dijela, dok se donja dva odnose na optimizacije provedene prema modelima iz drugog dijela Scenarija 3.



Slika 20 Ukupna ušteda u odnosu na referentni scenarij za sva četiri slučaja

Ukupna ušteda u odnosu na referentni scenarij za prvi dio Scenarija 3, prema Modelu 1, iznosi 183.200 €, što je jednako smanjenju od 23,93 %, a prema Modelu 2 ona je niža i iznosi 122.270 €, što je jednako smanjenju od 15,97 %. Ukupna ušteda za drugi dio Scenarija 3 prema Modelu 1 iznosi 259.000 €, odnosno troškovi goriva smanjeni su za 33,84 %, a prema Modelu 2 ona iznosi 193.070 €, što je jednako smanjenju troškova goriva za 25,22 %. Iz ovih podataka vidljivo je da je ušteda u troškovima goriva iz prvog dijela, ovisno o modelu, gotovo jednaka ili manja od uštede iz Scenarija 1, dok je ušteda iz drugog dijela za oba modela veća.

U Tablici 18 i Tablici 19 prikazani su tehnički parametri vrelovodnog kotla i DT za Slučaj 1 iz Scenarija 2. Vidljivi su rezultati koji se odnose na utrošak goriva i električne energije, isporučenu toplinsku energiju, prosječnu učinkovitost kotla i sezonski faktor grijanja DT. Iz ovih rezultata vidljivo je kako je ugradnja većeg spremnika doprinijela smanjenju potrošnje goriva za rad vrelovodnog kotla, odnosno povećanje proizvodnje toplinske energije iz DT. Također je vidljivo da su i efikasnosti, kako vrelovodnog kotla tako i DT, veće jer u onim vremenskim intervalima u kojima je, zbog maksimalne napunjenosti spremnika, rad onemogućen to ograničenje više ne postoji.

Tablica 18 Prikaz tehničkih parametara vrelovodnog kotla za Slučaj 1 iz Scenarija 2.

Naziv	Spremnik 1		Spremnik 2	
	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2
Utrošeno gorivo (MWh/god)	13.545	15.117	12.376	14.222
Isporučena toplinska energija (MWh/god)	12.002	13.505	11.719	13.483
Prosječna učinkovitost (%)	92,51	93,80	94,69	94.80

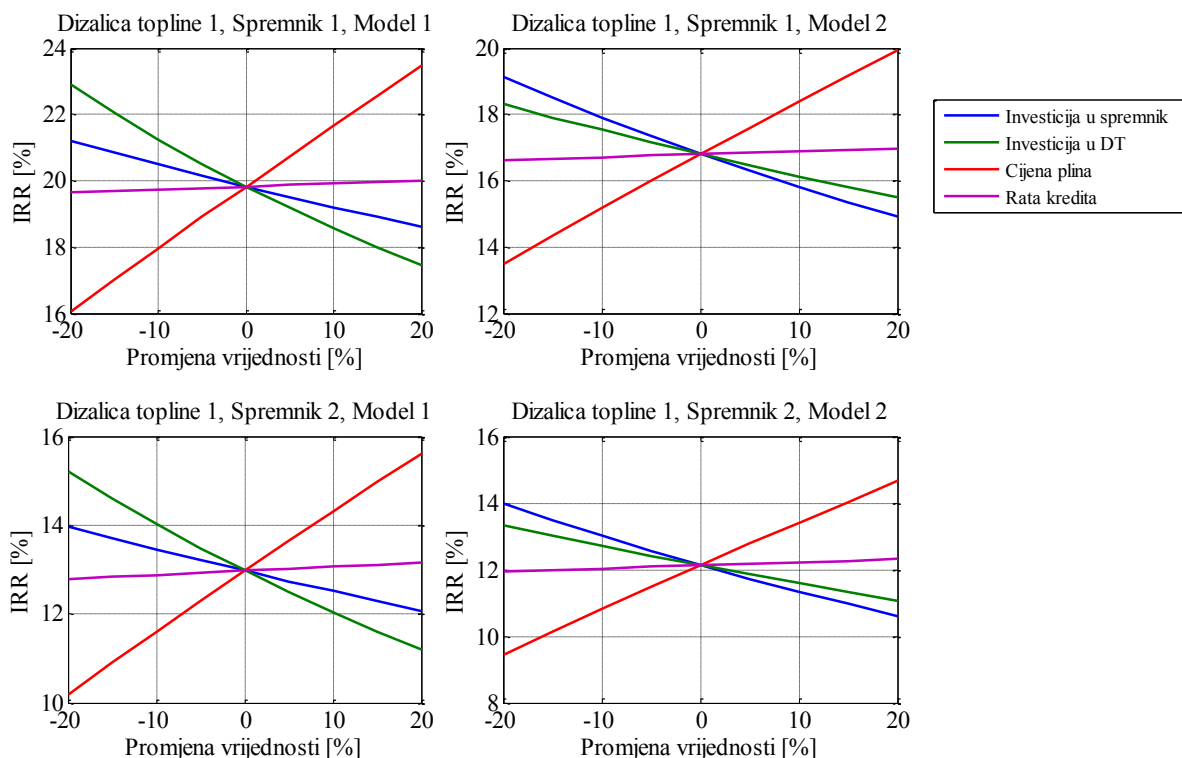
Tablica 19 Prikaz tehničkih parametara dizalice topline za Slučaj 1 iz Scenarija 2.

Naziv	Spremnik 100 MWh		Spremnik 500 MWh	
	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2
Utrošena električna energija (MWh/god)	1.232	587	1.318	589
Isporučena toplinska energija (MWh/god)	2.920	1.416	3.202	1.439
Sezonski faktor grijanja (%)	2,3703	2,4295	2,4510	2,4395

Rezultati ekonomskih analiza scenarija 3 prikazani su u Tablicama 28 - 31 koje su na kraju ovoga rada dodane kao prilog. U tablicama su prikazani parametri za određivanje NPV-a i IRR-a, a uvjeti kreditiranja jednaki su onima iz Scenarija 2. Ukupni investicijski troškovi ugradnje Dizalice topline 1 i Spremnika 1 iznose 1.007.777,78 €, od čega vlastita sredstava iznose 151.166,67 €. Ostatak investicijskih troškova pokriven je kreditom čija godišnja rata iznosi 82.527,87 €. Ukupni godišnji troškovi sastoje se od troškova održavanja spremnika i DT i iznose 3.650,00 €. NPV ovog projekta u slučaju cijena električne energije prema Modelu 1 iznosi 1.450.563,54 €, IRR-a 19,83%, a period povrata investicije očekuje se nakon 4,87 godina. NPV u slučaju cijena prema Modelu 2 iznosi 709.347,41 €, IRR-a 12,83%, a period povrata investicije očekuje se nakon 7 godina. Ukupni investicijski troškovi ugradnje Dizalice topline 1 i Spremnika 2 iznose 1.689.259,26 €, od čega su 253.388,89 € namirene iz vlastitih sredstava, a ostatak je pokriven kreditom. Godišnja rata kredita iznosi 138.335,04 €. Ukupni godišnji troškovi održavanja isti su kao i u prvom dijelu ovog scenarija i iznose 3.650,00 €. NPV ovog projekta prema cijenama iz Modela 1 iznosi 1.879.944,59 €, IRR-a 16,80%, a povrat investicije očekuje se nakon 5,63 godine. NPV prema cijenama iz Modela 2 iznosi 1.072.069,16 €, IRR 12,13%, a povrat investicije očekuje se nakon 7,33 godine.

Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti provedena je za četiri parametra čiji je utjecaj na ekonomsku opravdanost projekta značajan. Analizirani su investicijski troškovi ugradnje toplinskog spremnika i DT, cijena plina i kamatna stopa kredita. Analiza osjetljivosti provedena je isto kao u Scenariju 2, a na Slici 21 nalazi se grafički prikaz rezultata ove analize, gdje se gornja dva dijagrama, ovisno o cijeni električne energije, odnose na ugradnju Spremnika 1, a donja dva na ugradnju Spremnika 2. Na dijagramima je vidljivo da najveći utjecaj na ekonomsku isplativost projekta imaju investicijski troškovi spremnika, ukoliko je riječ o Spremniku 2, odnosno DT, ukoliko je riječ o Spremniku 1, i cijenu plina. Vidljivo je da u svim analiziranim slučajevima najutjecajniji parametar cijena plina pri kojoj se iznos IRR-a za ugradnju Spremnika 1 kreće između 16 i 23,5 % prema Modelu 1, odnosno 13,7 i 20,1 % prema Modelu 2. U slučaju ugradnje Spremnika 2 iznos IRR-a kreće se između 10,2 i 15,7 % prema Modelu 1, odnosno 9,5 i 14,5 % prema Modelu 2.



Slika 21 Analiza osjetljivosti za Scenarij 2 / Slučaj 1 pri ugradnji dva različita spremnika.

U Tablici 20 prikazani su rezultati analize osjetljivosti koja je provedena za najpovoljnije i najnepovoljnije uvjete u kojima su svi prethodno navedeni parametri uvećani, odnosno umanjani za 20% ovisno o njihovom utjecaju na iznos NPV-a i IRR-a

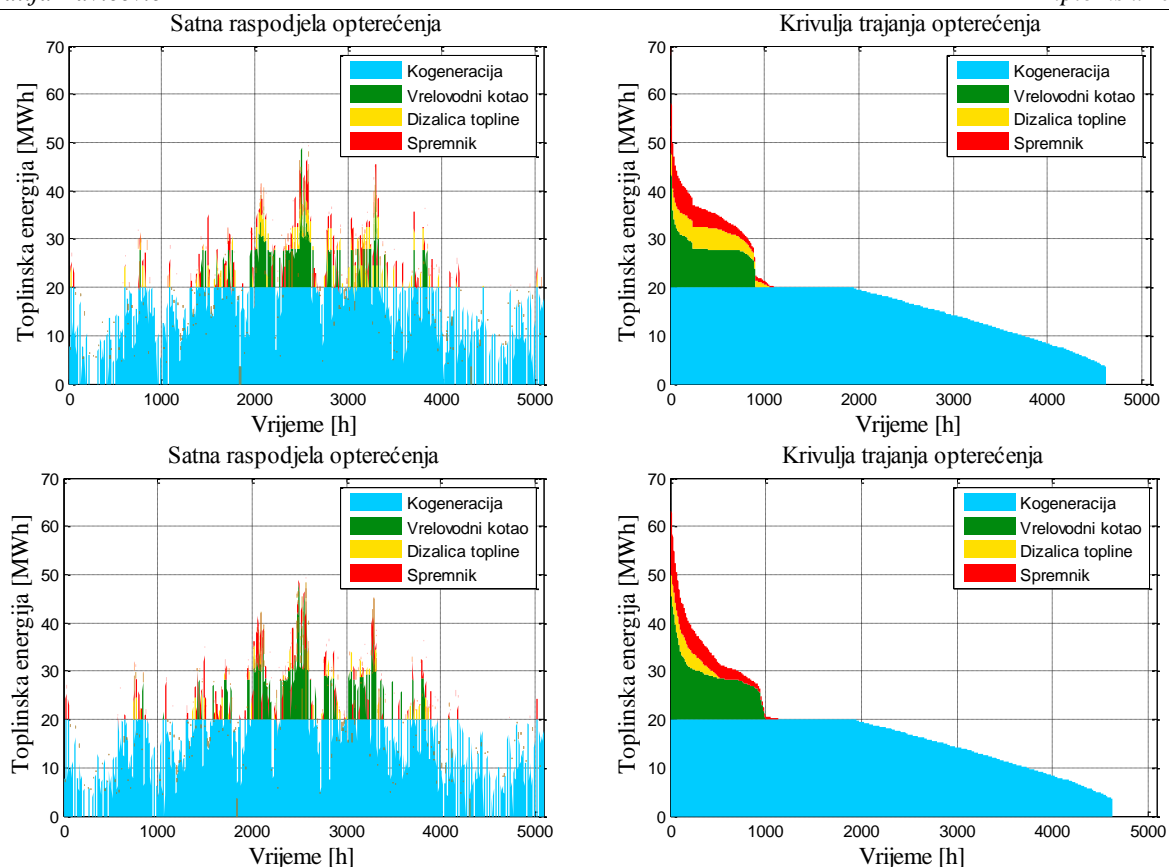
Tablica 20 Minimum i maksimum NPV-a i IRR-a za Slučaj 1 Scenarija 2.

Naziv		Model 1			Model 2		
		NPV	IRR	PP (god.)	NPV	IRR	PP (god.)
Spremnik 1	Minimum	710.490,48 €	13,06%	7,45	169.881,03 €	7,83%	9,14
	Maksimum	2.305.680,65 €	29,33%	3,25	1.326.378,12 €	19,58%	5,92
Spremnik 2	Minimum	792.690,84 €	10,85%	7,32	203.463,11 €	7,32%	9,05
	Maksimum	3.131.318,00 €	25,03%	3,14	2.063.944,51 €	18,59%	5,43

6.3.2. Slučaj 2 - Dizalica topline snage 4,5 MW

Prvi dio – Spremnik kapaciteta 100 MWh

Dijagrami na Slici 22 prikazuju satne raspodjelu i krivulju trajanja opterećenja za slučaj ugradnje Dizalice topline 1 i Spremnika 2, uz cijene električne energije prema različitim modelima. Gornja dva dijagrama odnose se na Model 1, a donja dva odnose se na Model 2. Iz ovih je dijagrama ponovno vidljivo kako se zadovoljava potražnja iz pojedinih postrojenja u svakom vremenskom trenutku, odnosno koliko je toplinske energije iz pojedinog postrojenja isporučeno u mrežu CTS-a. Iz Tablice 21 vidljivo je da prema cijenama iz Modela 1 rad DT zabilježen u 1497 vremenskih intervala, dok je rad vrelovodnog kotla zabilježen u 911 vremenskih intervala. Taj broj je za razliku od Slučaja 1 znatno manji jer DT u kraćem vremenskom intervalu, ovisno o iznosu faktora grijanja, ima mogućnost isporuke gotovo 4,5 puta više toplinske energije. Prema Modelu 2 rad DT zabilježen je u 858, a rad vrelovodnog kotla u 1015 vremenskih intervala. Za razliku od Modela 1, u kojem vrelovodni kotao većinu vremena radi na snazi od 7,5 MW, njegov rad prema Modelu 2 većinu vremena je na višim snagama. Razlog tome je spremnik relativno malog kapaciteta koji ovakvoj konfiguraciji DT ne omogućava rad u svim vremenskim intervalima u kojima je njen rad povoljniji od rada vrelovodnog kotla.



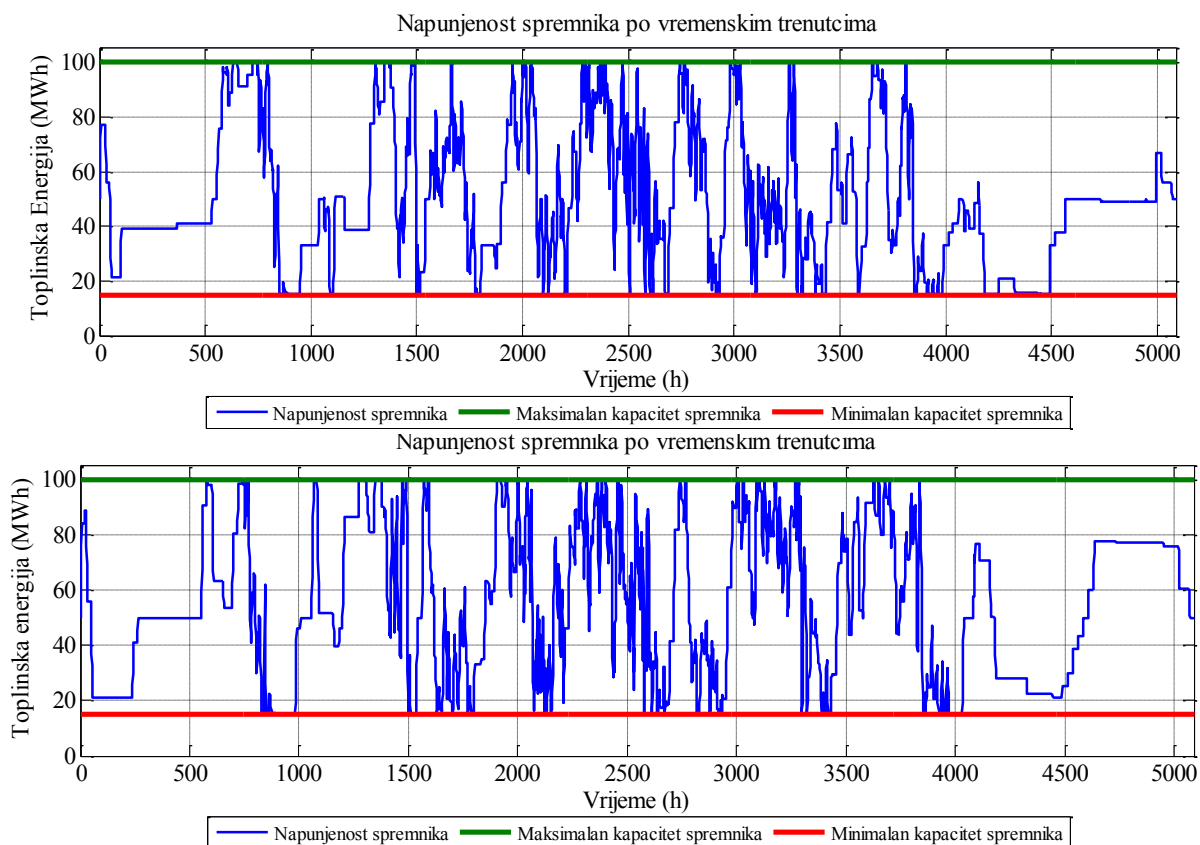
Slika 22 Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja pri ugradnji dizalice topline snage 4,5 MW i toplinskog spremnika kapaciteta 100 MWh.

Prema Tablici 21 efektivni broj sati pri maksimalnoj snazi, prema Modelu 1, iznosi 1.443,9 sati DT i 168,5 sati za vrelovodni kotao. Udio sati pri maksimalnoj snazi DT iznosi 96,45 %, a onaj vrelovodnog kotla 18,49 %. Prema Modelu 2 efektivni broj sati pri maksimalnoj snazi DT iznosi 799,2 sati i 226,5 sati za vrelovodni kotao. Udio sati pri maksimalnoj snazi DT iznosi 93,14 %, a onaj vrelovodnog kotla 22,41 %. Vidljivo je da su ti udjeli za razliku od onih iz Scenarija 1 nešto niži prvenstveno zbog veće snage DT koja u manjem broju vremenskih intervala ima mogućnost isporuke više topline.

Tablica 21 Aktivnost dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivni broj sati pri maksimalnom opterećenju

Naziv	Dizalica topline 1 MW			Vrelovodni kotao		
	Vrijeme rada (h)	τ_{ef} (h)	η_{ef}	Vrijeme rada (h)	τ_{ef} (h)	η_{ef}
Model 1	1.497	1.443,9	96,45 %	911	168,5	18,49 %
Model 2	858	799,2	93,14 %	1015	226,5	22,31 %

Na Sliku 23 grafički je prikazana napunjenost spremnika za cijelu sezonu grijanja. Gornji dijagram odnosi se na cijene električne energije prema Modelu 1, a donji prema Modelu 2. I u ovom slučaju zadovoljeni su rubni uvjeti iz matematičkog modela koji se odnose na minimalan i maksimalan kapacitet spremnika te njegovu napunjenost u početnom i krajnjem vremenskom intervalu.

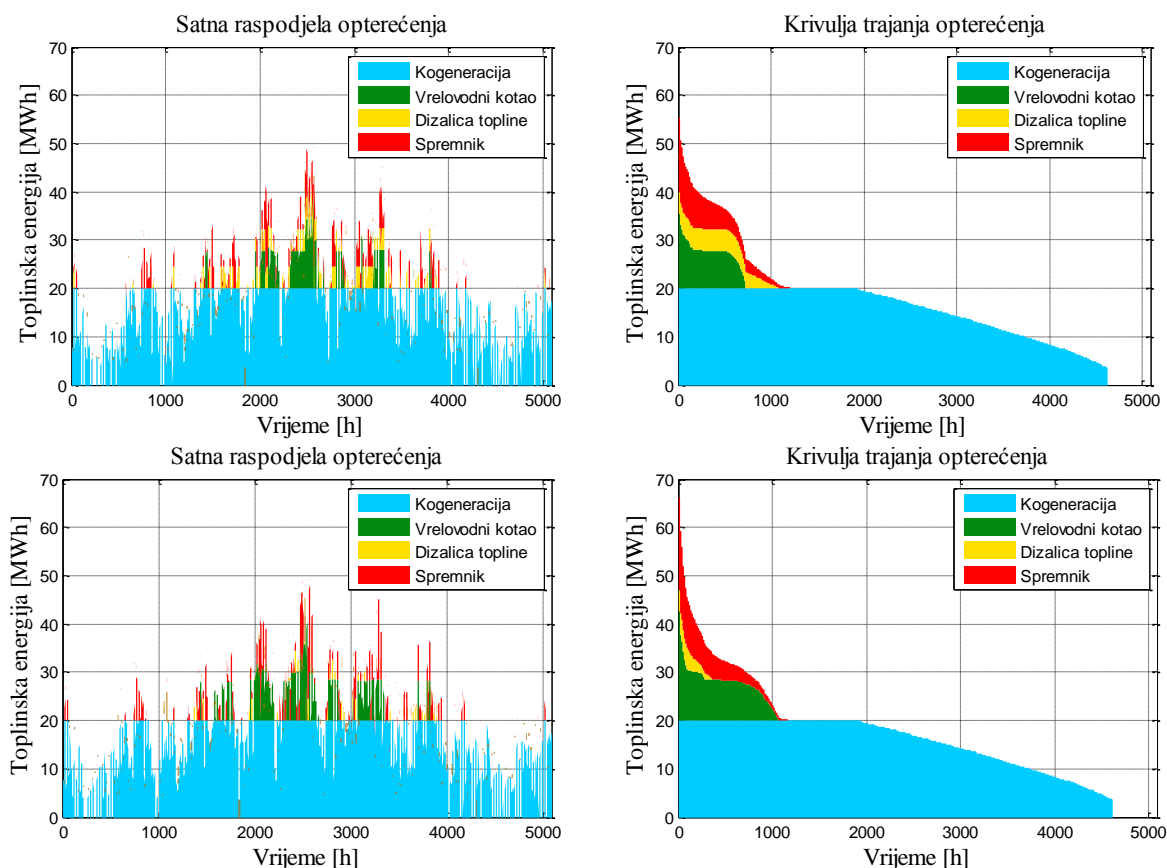


Slika 23 Napunjenosti spremnika kapaciteta 100 MWh pri različitim cijenama el. energije.

Drugi dio – Spremnik kapaciteta 500 MWh

Dijagrami na Slici 24 prikazuju satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja za slučaj ugradnje Dizalice topline 2 i Spremnika 2. Gornji dijagrami odnose se na cijene električne energije prema Modelu 1, a donje dvije prema Modelu 2. Iz ovih je dijagrama ponovno vidljivo kako se zadovoljava potražnja iz pojedinih postrojenja u svakom vremenskom trenutku, odnosno koliko je toplinske energije iz pojedinog postrojenja isporučeno u mrežu CTS-a. Iz Tablice 22 vidljivo je da je rad DT prema cijenama električne energije iz Modela 1 zabilježen u 1.867 vremenskih intervala, dok je rad vrelovodnog kotla zabilježen u svega 769 vremenskih intervala. Za razliku od prvog dijela, u ovom dijelu kapacitet spremnika je pet puta veći što DT daje dodatan prostor za rad u vremenskim trenucima u kojima joj je u prvom

dijelu, zbog maksimalne napunjenosti spremnika, rad bio onemogućen. Rad DT prema Modelu 2 zabilježen je u 821, dok je rad vrelovodnog kotla zabilježen u 1195 vremenskih trenutaka. Razlika u broju sati rada između prvog i drugog dijela je i u ovom slučaju jako mala zbog čega se može zaključiti da je, prema modelu s ovakvim ulaznim podacima za DT, postignut njihov maksimum.



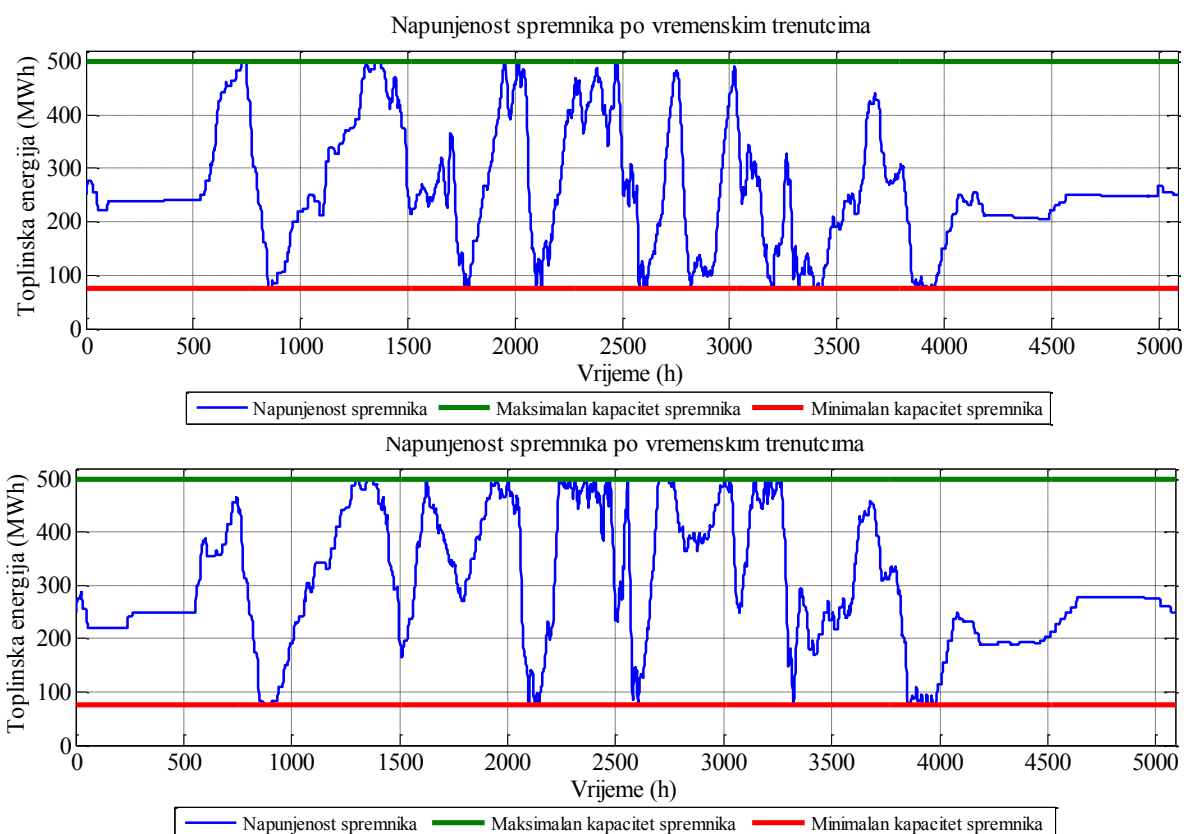
Slika 24 Satne raspodjele i krivulje trajanja opterećenja pri ugradnji dizalice topline snage 4,5 MW i toplinskog spremnika kapaciteta 500 MWh.

Prema Tablici 22 efektivan broj sati pri maksimalnoj snazi, prema Modelu 1, iznosi 1.835,2 sati za DT i 133,2 sata za vrelovodni kotao. Osim više radnih sati DT, u odnosu na onu iz prvog dijela, udio sati pri maksimalnoj snazi nešto je veći i iznosi 98,29 %, dok je onaj vrelovodnog kotla pao na 19,16 %. Prema Modelu 2 efektivan broj sati pri maksimalnoj snazi DT iznosi 770,8 sati i 229,0 sati za vrelovodni kotao. U ovom slučaju većim kapacitetom spremnika omogućen je rad DT pri maksimalnoj snazi 93,88 % vremena što je porast u odnosu na manji spremnik iz prvog dijela.

Tablica 22 Aktivnost dizalice topline i vrelovodnog kotla i efektivan broj sati pri maksimalnom opterećenju

Naziv	Dizalica topline 1 MW			Vrelovodni kotao		
	Vrijeme rada (h)	τ_{ef} (h)	η_{ef}	Vrijeme rada (h)	τ_{ef} (h)	η_{ef}
Model 1	1.867	1.835,2	98,29 %	769	133,2	17,32 %
Model 2	821	770,8	93,88 %	1195	229,0	19,16 %

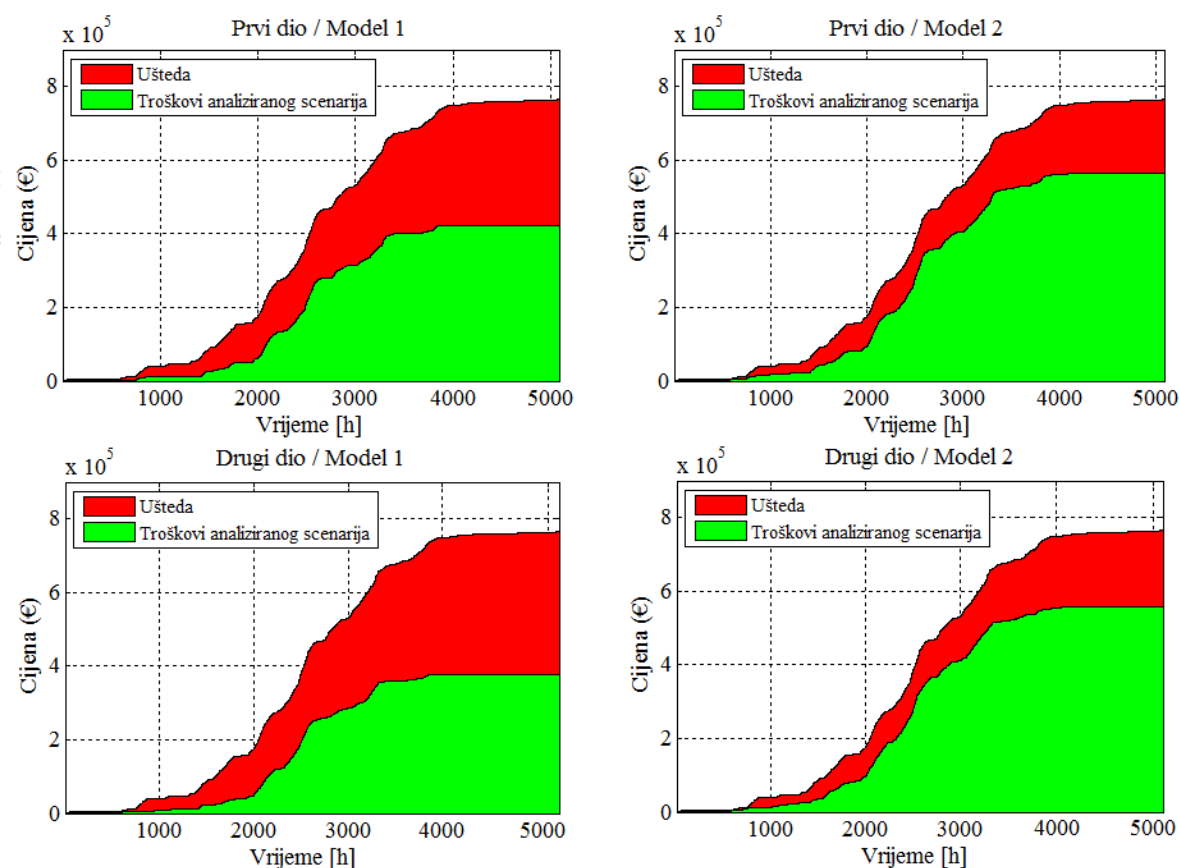
Na Slici 25 grafički je prikazana napunjenost spremnika za cijelu sezonu grijanja gdje se gornji dijagram odnosi na cijene električne energije prema Modelu 1, a donji prema Modelu 2. I u ovom slučaju zadovoljeni su rubni uvjeti iz matematičkog modela koji se odnose na minimalan i maksimalan kapacitet spremnika te njegovu napunjenost u početnom i krajnjem vremenskom intervalu.

**Slika 25 Napunjenosti spremnika kapaciteta 500 MWh pri različitim cijenama el. energije.**

Tehno-ekonomska analiza

Kao i u Slučaju 1 ovog scenarija dijagrami na Slici 26 prikazuju akumulaciju troškova za cijelu sezonu grijanja. Zelenom bojom označeni su ukupni troškovi goriva na kraju sezone

prema pojedinom modelu analiziranog scenarija, dok je crvenom bojom označena ušteda u troškovima goriva. Gornja dva dijagrama odnose se na optimizacije provedene prema modelima iz prvog dijela, dok se donja dva odnose na optimizacije provedene prema modelima iz drugog dijela Slučaja 2, Scenarija 3.



Slika 26 Akumulacija troškova i ukupna ušteda pri različitim cijenama električne energije.

Ukupna ušteda u odnosu na referentni scenarij za prvi dio Scenarija 3, prema Modelu 1, iznosi 473.046 €, što je jednako smanjenju od gotovo 61,81 %, a prema Modelu 2 ona je niža i iznosi 283.251 €, što je jednako smanjenju od 37,01 %. Ukupna ušteda za drugi dio Scenarija 3 prema Modelu 1 iznosi 538.918 €, odnosno troškovi goriva smanjeni su za 70,41 %, a prema Modelu 2 ona iznosi 289.148 €, što je jednako smanjenju troškova goriva za 37,78 %. Iz ovih podataka vidljivo je da su ušteda u troškovima goriva iz oba dijela, ovisno o modelu, i do nekoliko puta veće od ušteda iz Scenarija 1. Razlika između prvog i drugog dijela ovog slučaja također je mala što znači da povećanje kapaciteta toplinskog spremnika nema značajan utjecaj na smanjenje troškova proizvodnje toplinske energije pri ovakvoj konfiguraciji sustava.

U Tablici 23 i Tablici 24 prikaz je tehničkih parametara analiziranog vrelovodnog kotla i DT za Slučaj 2 Scenarija 3. U tablicama su navedeni rezultati koji se odnose na potrošnju goriva i električne energije, proizvedenu toplinsku energiju, prosječnu učinkovitost rada vrelovodnog kotla i sezonski faktor grijanja DT. Sezonski faktor grijanja za dizalicu topline niži je nego u Slučaju 1 iz razloga što je snaga DT veća. Time je DT u manje vremenskih trenutaka isporučila veću količinu toplinske energije.

Tablica 23 Prikaz tehničkih parametara vrelovodnog kotla za Slučaj 2 iz Scenarija 3.

Naziv	Spremnik 100 MWh		Spremnik 500 MWh	
	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2
Utrošeno gorivo (MWh/g)	8.948,5	11.959,0	7.082,6	12.156,0
Isporučena toplinska energija (MWh/g)	8.424,6	11.325,0	6.663,8	11.453,0
Prosječna učinkovitost (%)	94,15	94,69	94,09	94,22

Tablica 24 Prikaz tehničkih parametara dizalice topline za Slučaj 2 iz Scenarija 3.

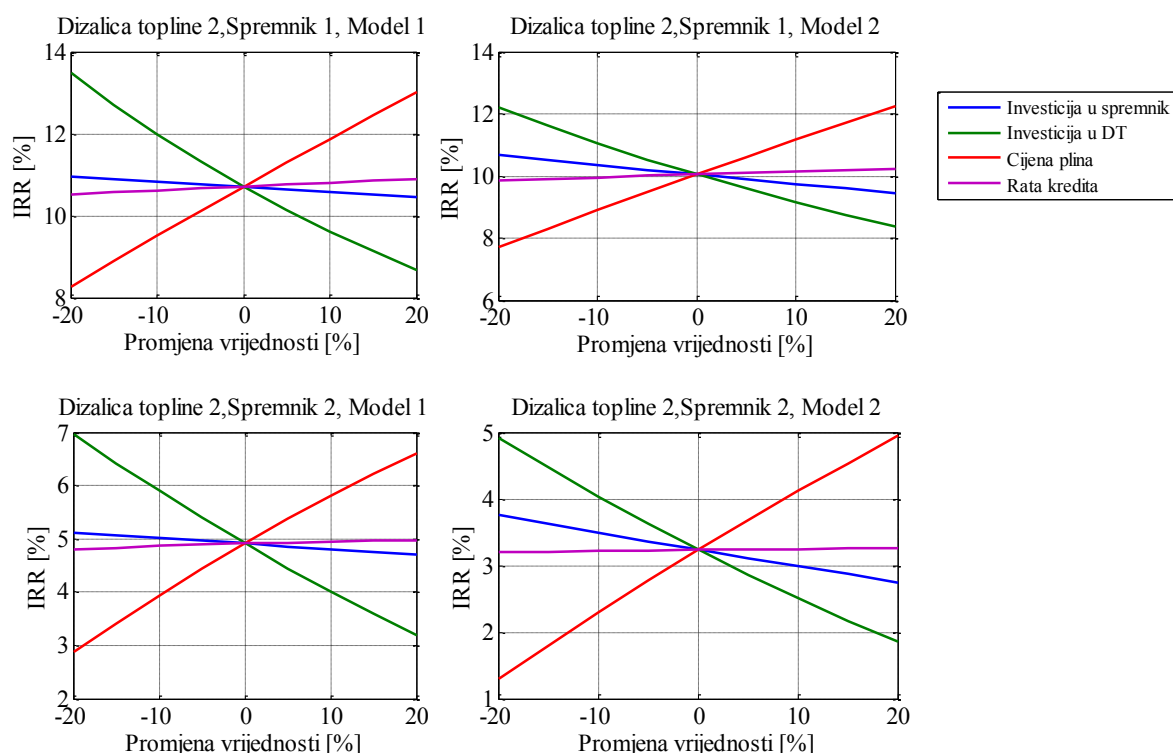
Naziv	Spremnik 100 MWh		Spremnik 500 MWh	
	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2
Utrošena električna energija (MWh/g)	2.944	1.565	3.562	1.422
Isporučena toplinska energija (MWh/g)	6.497	3.596	8.252	3.468
Sezonski faktor grijanja (%)	2,2067	2,2974	2,3182	2,4387

Rezultati ekonomskih analiza slučaja 2 u scenariju 3 prikazani su u Tablicama 32 - 35 koje se nalaze u prilogu ovog rada. U tablicama su prikazani parametri za određivanje NPV-a i IRR-a, a uvjeti kreditiranja jednaki su onima iz ranijih scenarija. Ukupni investicijski troškovi ugradnje Dizalice topline 2 i Spremnika 1 iznose 3.387.777,78 €, od čega vlastita sredstava iznose 508.166,67 €. Ostatak investicijskih troškova pokriven je kreditom čija godišnja rata iznosi 277.428,32 €. Ukupni godišnji troškovi sastoje se od troškova održavanja spremnika i DT i iznose 3.650,00 €. NPV ovog projekta u slučaju cijena električne energije prema Modelu 1 iznosi 1.686.245,01 €, IRR-a 10,71%, a period povrata investicije očekuje se nakon 7,99 godina. NPV u slučaju cijena prema Modelu 2 iznosi -24.298,69 €, IRR-a 4,91%, a period povrata investicije očekuje se nakon 12,33 godina. Ukupni investicijski troškovi ugradnje Dizalice topline 2 i Spremnika 2 iznose 4.069.259,26 €, od čega su 610.388,89 € namirene iz vlastitih sredstava, a ostatak je pokriven kreditom. Godišnja rata kredita iznosi 333.235,48 €. Ukupni godišnji troškovi održavanja isti su kao i u prvom dijelu ovog scenarija i iznose

3.650,00 €. NPV ovog projekta prema cijenama iz Modela 1 iznosi 1.771.290,62 €, IRR-a 10,05 %, a povrat investicije očekuje se nakon 8,35 godina. NPV prema cijenama iz Modela 2 iznosi -550.408,78 €, IRR 3,23%, a povrat investicije očekuje se nakon 14,38 godina.

Analiza osjetljivosti

U ovom slučaju analiza osjetljivosti ponovo je provedena kao i za Slučaj 1, gdje je analiziran utjecaj pojedinih parametara na ekonomsku isplativost projekta. Analiza osjetljivosti provedena je isto kao u Scenariju 2, a na Slici 27 nalazi se grafički prikaz rezultata ove analize, gdje se gornja dva dijagrama, ovisno o cijeni električne energije, odnose na ugradnju Spremnika 1, a donja dva na ugradnju Spremnika 2. Na dijagramima je vidljivo da najveći utjecaj na ekonomsku isplativost projekta imaju investicijski troškovi dizalice topline i cijena plina. Za ugradnju Spremnika 1 iznos IRR-a kreće između 8,2 i 13,8 % prema Modelu 1, odnosno 7,9 i 12,2 % prema Modelu 2. U slučaju ugradnje Spremnika 2 iznos IRR-a kreće se između 2,9 i 13,7 % prema Modelu 1, odnosno 1,5 i 4,9 % prema Modelu 2.



Slika 27 Analiza osjetljivosti za Scenarij 2 / Slučaj 2 pri ugradnji dva različita spremnika.

U Tablici 25 prikazani su rezultati analize osjetljivosti koja je provedena za najpovoljnije i najnepovoljnije uvjete u kojima su svi prethodno navedeni parametri uvećani, odnosno umanjani za 20% ovisno o njihovom utjecaju na iznos NPV-a i IRR-a. U tablici je vidljivo da

za slučaj ugradnje Spremnika 1 prema Modelu 1 investicija isplativa, dok prema Modelu 2 postoji rizik od ulaganja u ovakav projekt. Ukoliko bi se promatrali najpovoljniji mogući uvjeti, investicija bi bila opravdana, u protivnome je vrlo izgledno da ostvarena ušteda nije dovoljna za pokrivanje i otplatu troškova investicije. Isto vrijedi i za Spremnik 2 gdje kod obje investicije postoji rizik od neisplativosti projekta, no ukoliko se posluje prema Modelu 1 taj rizik je znatno niži od onoga prema Modelu 2.

Tablica 25 Minimalan i maksimalan iznos NPV-a i IRR-a za Slučaj 2 Scenarija 3.

Naziv		Model 1			Model 2		
		NPV	IRR	PP (god.)	NPV	IRR	PP (god.)
Spremnik 1	Minimum	57.280,38 €	6,19%	7,45	-1.430.893,58 €	0,85%	13,23
	Maksimum	3.519.271,02 €	16,66%	3,25	1.287.119,20 €	9,15%	6,94
Spremnik 2	Minimum	-138.152,30 €	5,62%	7,32	-2.143.173,64 €	-0,66%	23,12
	Maksimum	3.889.968,80 €	15,77%	3,14	952.467,57 €	7,28%	12,11

7. DISKUSIJA

Pozitivne i negativne strane prezentiranog pristupa

Pri razvoju optimizacijskog modela, savladavaju se razni aspekti programiranja u optimizacijskom alatu MATLAB, prepreke uzrokovane ograničenjima ovakvog pristupa te problem upravljanja postrojenjima na kojima se provedi optimizacija. Kako je MATLAB među ostalim i alat za programiranje, za razliku od postojećih vizualnih programa, ovako razvijen optimizacijski model ima visok stupanj fleksibilnosti koja mu omogućava promjenu svih željenih parametara i implementaciju novih ideja.

Funkcija cilja u ovom optimizacijskom modelu odnosi se na minimizaciju troškova goriva pri proizvodnji toplinske energije u CTS-u. Ovo je jedan od glavnih problema s kojim se danas suočavaju postrojenja za proizvodnju toplinske energije. Ukoliko se u obzir žele uzeti negativni utjecaji na okoliš zbog velikih emisija stakleničkih plinova funkciju cilja moguće je proširiti dodatnim troškovima za pojedine emisije koje ovise o potrošnji goriva i učinkovitosti postrojenja, što može rezultirati detaljnijom i preciznijim tehno-ekonomskom analizom.

Unatoč pozitivnim, postoje i negativne strane korištenja nelinearnog modela. Zbog nelinearnosti potrebno je uvođenje pojednostavljenja koja imaju velik utjecaj na rezultate simulacija. Najbolji primjeri su učinkovitost rada toplane, koja je aproksimirana sigmoidnom krivuljom, određivanje satne potražnje za toplinskom energijom i faktora grijanja, koji su određeni na temelju prosječnih vanjskih temperatura za grad Karlovac, i cijene električne energije koje su odabrane prema povijesnim podacima s tržišta električnom energijom. Nedostatak nelinearnih modela su i zahtjevi za jakom procesorskom moći računala te relativno dugo vrijeme potrebno za provedbu optimizacije, zbog čega je provođenje optimizacije za cijelu sezonu grijanja neučinkovito. Iz tog razloga rješavanju takvih problema pristupa se u manjim vremenskim intervalima, što također ima negativan utjecaj na pronalazak optimalnog rješenja. Uz sve te prednosti i nedostatke, odabir korištenja preciznog ali računalno sporog modela ili jednostavnog ali manje preciznog, bazira se na raspoloživom vremenu, procesorskoj moći i broju simulacija koje je potrebno provesti.

Pretpostavke ulaznih podataka

U sklopu ovog rada optimizacija je provođena u manjim vremenskim intervalima. Rezultati tih optimizacija spojeni su u cjelinu i aproksimiraju rad postrojenja za cijelu sezonu grijanja. Cilj toga je verifikacija rada optimizacijskog modela kako pri varijabilnim tako i pri fiksnim cijenama energenata.

Važno je napomenuti da optimizacijski model radi prema unaprijed određenim cijenama energenata. Stvarne odluke o tome kako voditi rad pojedinih postrojenja ili kako kontrolirati napunjenost toplinskog spremnika moraju uzeti u obzir količinu goriva koje je na raspolaganju, nepredvidivost vremenskih promjena i cijena energenata, te inerciju sustava.

Tehnički parametri jedinica za proizvodnju toplinske energije i toplinskog spremnika preuzeti su iz literature. Npr. vrijeme potrebno za postizanje maksimalne snage postrojenja, količina energije koja se u jednom vremenskom trenutku može pohraniti ili iz toplinskog spremnika isporučiti, u stvarnosti variraju od slučaja do slučaja jednako kao što to čini i faktor grijanja za svaku pojedinu dizalicu topline. U rezultatima analiziranih scenarija često su prisutni nagli skokovi u proizvodnji toplinske energije iz toplane. Ukoliko se u obzir uzmu inercija i poteškoće s regulacijom sustava ti prijelazi bili bi znatno blaži.

Analizirani vremenski interval od jednog sata prevelik je za određivanje utjecaja paljenja i gašenja postrojenja na smanjenje troškova, zbog čega gubici koji proizlaze iz tog procesa nisu uzeti u obzir. Ukoliko se u obzir uzme i analiza tih parametara, te minimalan broj sati rada postrojenja, potrebna je primjena drugačijeg oblika optimizacije koja omogućava istovremeno optimiranje nelinearnih problema i cijelih brojeva.

Rasprava oko rezultata scenarija

U ovom radu uspješno je razvijen optimizacijski model s ciljem vođenja vrelovodnog kotla i DT u CTS-u, koji je primijenjen na stvarnom slučaju grada Karlovca. Cilj ovog modela je minimizacija troškova proizvodnje toplinske energije koji uključuje energetske tokove na izlazu iz analiziranih postrojenja, njihove učinkovitosti i rad toplinskog spremnika.

U referentnom scenariju definirani su troškovi goriva za pogon vrelovodnog kotla termoelektrane, i iznose 765.350 €. Rad kotla u tom scenariju iznimno je neučinkovit jer se dio proizvedene topline, zbog premale potražnje, ispušta u okoliš. Zbog takve konfiguracije

sustava uočen je potencijal za smanjenjem troškova, koje je dobrim vođenjem postrojenja, moguće smanjiti i za 22,15%.

Kako bi se ostvarila ta ušteda postrojenju se mora omogućiti veća fleksibilnost u radu. U Scenariju 2 analiziran je utjecaj ugradnje toplinskog spremnika, različitih kapaciteta, na tehno-ekonomske parametre CTS-a. Nakon optimizacije količina energije koju je vrelovodni kotao isporučio jednaka je potražnji iz mreže, čime su eliminirani toplinski gubici iz referentnog scenarija. Ekonomskom analizom je pokazano da je investicija u toplinski spremnik opravdana, jer su uštede u gorivu bile dovoljno velike za relativno brz povrat investicije. Za oba slučaja povrat investicije je kraći od 4 godine što je s obzirom na životni vijek opreme, koji je procijenjen na 20 godina, relativno kratko. Ukupni godišnji troškovi iznose 574.110 €. Analizom osjetljivosti prikazano je da i znatno povećanje cijene goriva i investicijskih troškova i dalje omogućava relativno brz povrat investicije koji u slučaju većeg spremnika iznosi 6,87 godina. Značajan utjecaj na rezultate optimizacije imaju uvedene pretpostavke koje, zbog pojednostavljenja modela, zanemaruju toplinske gubitke spremnika, emisije stakleničkih plinova, minimalan broj sati rada postrojenja i ostale manje bitne parametre.

U scenariju 3 analiziran je utjecaj ugradnje DT u kombinaciji s toplinskim spremnikom u CTS. Optimizacija je provedena za četiri slučaja u kojima je analiziran utjecaj ugradnje DT i toplinskog spremnika različitih kapaciteta na tehno-ekonomske parametre CTS-a. Iz rezultata analiziranih slučajeva vidljivo je da su najveće uštede ostvarene u slučaju ugradnje DT velike snage i toplinskog spremnika velikog kapaciteta gdje su troškovi goriva u odnosu na referentni scenarij niži za 70,41 %. Iako ušteda u tom slučaju iznosi 538.918 € godišnje investicijski troškovi su previsoki te je upitna isplativost projekta. Najbolji omjer uštede i investicijskih troškova je ostvaren pri ugradnji DT manje snage i toplinskog spremnika manjeg kapaciteta u slučaju kada je optimizacija provedena za varijabilne cijene električne energije prema Modelu 1. U tom slučaju su povrat investicije, koji iznosi 4,87 godina, vrijednost IRR-a, koja iznosi 19,83 % i NPV-a, koji iznosi 1.450.563,54 €, najpovoljniji. Analizom osjetljivosti pokazano je da su za slučaj ugradnje DT manje snage ostvarene uštede dovoljno velike za tehno-ekonomsku opravdanost projekta jer se unutarnja stopa povrata kreće između 7,32%, u slučaju odabira najnepovoljnijih uvjeta, i 29,33% za slučaj najpovoljnijih uvjeta. Ugradnja DT veće snage u kombinaciji s oba spremnika pokazala se kao vrlo rizična, te je njezina tehno-ekonomska isplativost upitna.

8. ZAKLJUČAK

Razvojem novih centraliziranih energetske sustava postavljaju se sve veći zahtjevi na učinkovitost i fleksibilnost te integraciju sve većeg broja obnovljivih, intermitentnih izvora energije, koji zahtijevaju prilagodbu ili prenamjenu postojećih termoenergetskih postrojenja za rad s brzim promjenama opterećenja za koja ona najčešće nisu namijenjena.

Toplinski spremnici postojećim jedinicama za proizvodnju toplinske energije u CTS-u omogućuju rad bez naglih promjena, te im povećavaju efikasnost koja zbog smanjene potrošnje primarne energije otvara prostor za ostvarivanjem ušteda. U ovom diplomskom radu prikazano je da ugradnja toplinskog spremnika može značajno utjecati na rad postrojenja smanjujući mu troškove goriva i do 22,15%. Kako su investicijski troškovi ugradnje spremnika relativno niski povrat investicije ostvaruje se u relativno kratkom vremenskom periodu koji najčešće nije duži od nekoliko godina.

DT specifični su termoenergetski uređaji koji svojim visokoučinkovitim i fleksibilnim djelovanjem vrlo dobro rade u kombinaciji s obnovljivim, intermitentnim izvorima energije. Integriraju li se zajedno s toplinskim spremnikom u centralizirani energetski sustav, njihove prednosti su značajne, jer osim što povećavaju fleksibilnost sustava, ne ostvaruju negativan utjecaj na okoliš. U ovom radu prikazano je da ugradnja DT može dodatno utjecati na smanjenje troškova rada vrelovodnog kotla termoelektrane. Troškovi goriva smanjeni su i do 70,41 %, no visoki investicijski troškovi koji su karakteristični za ovu tehnologiju u većini su slučajeva previsoki, pa je isplativost ugradnje upitna.

Ukoliko je kombinacija toplinskog spremnika i DT dobro dimenzionirana za potrebe sustava njezin rad omogućava ostvarivanje značajnih ušteda, kako u ekonomskom tako i ekološkom smislu jer su emisije stakleničkih plinova za proizvodnju iste količine toplinske energije manje i do 40 %.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekata STRATEGO (ugovor broj EE/13/650) financiranog od strane Europske komisije kroz program Intelligent Energy Europe i 4DH financiranog od strane Inovation Fund Denmark.

LITERATURA

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change and O. Edenhofer, Eds., *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press, 2014.
- [2] "Global Carbon Emissions | CO2 Now | Current CO2." [Online]. Dostupno na: <http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now/global-carbon-emissions.html>. [Pristupljeno: 04.01.2016.].
- [3] "Lessons from liberalised electricity markets," *Int. Energy Agency*.
- [4] CODE2 - Cogeneration Observatory and Dissemination Europe, "European Cogeneration Roadmap," 01.2015.
- [5] D. Andrews, A. Krook Riekkola, E. Tzimas, J. Serpa, J. Carlsson, and N. Padro-Garcia, "Background Report on EU-27 District Heating and Cooling Potentials, Barriers, Best Practice and Measures of Promotion," EUR 25289 EN, 2012.
- [6] "Technology Data for Energy Plants: Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion," Danish Energy Agency, 2012.
- [7] İ. Dinçer and M. Rosen, *Thermal energy storage: systems and applications*, 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2011.
- [8] V. Kolega, "Strategija održivog korištenja energije Karlovačke županije." Karlovac : Regionalna energetska agencija Sjeverozapadne Hrvatske, 2009.
- [9] D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, H. Lund, D. Trier, U. Persson, D. Nilsson, and S. Werner, "Heat Roadmap Europe 2050: First pre-study for the EU27," 2012.
- [10] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, B. Möller, P. A. Østergaard, and S. Nielsen, "The role of district heating in decarbonising the EU energy system and a comparison with existing strategies," 2014.
- [11] A. K. Sachan, "Study of the Integration of District Heating and Cooling with an Electro-Thermal Energy Storage System," 2012.
- [12] Ecoheatcool, "Possibilities with more district heating in Europe," 2006.
- [13] "DHC & Statistics." [Online]. Dostupno na: <http://www.euroheat.org/DHC---Statistics-4.aspx>. [Pristupljeno 05.01.2016.].
- [14] Godišnji energetske pregled, "Energija u Hrvatskoj 2013."
- [15] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, and B. V. Mathiesen, "4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems," *iEnergy*, vol. 68, pp. 1–11, 04.2014.
- [16] M. Börjesson and E. O. Ahlgren, "Biomass CHP Energy Systems: A Critical Assessment," in *Comprehensive Renewable Energy*, A. Sayigh, Ed. Oxford: Elsevier, 2012, pp. 87–97.
- [17] F. Rosillo Callé, Ed., *The biomass assessment handbook: bioenergy for a sustainable environment*. London ; Sterling, VA: Earthscan, 2007.
- [18] IEA - International Energy Agency, "Biomass for Power Generation and CHP," 2007.
- [19] V. Novaković, "Biomass combined heat and power (CHP) for electricity and district heating," Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [20] Euroheat & Power, "Guidelines for assessing the efficiency of district heating and district cooling system," 2007.

-
- [21] V. Soldo, "Dizalice topline s OIE." 2015.
- [22] M. Brčić, "High temperature heat pumps applying natural fluids," Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [23] "Klimatizacijski uređaji, rashladnici kapljevina i dizalice topline s kompresorima na električni pogon za grijanje i hlađenje prostora -- 4. dio: Zahtjevi (EN 14511-4:2013)." Hrvatski zavod za norme, 2013.
- [24] P. Rasmussen, "Calculation of SCOP for heat pumps according to EN 14825." Danish Technological Institute, 31.12.2011.
- [25] S. Kranz, G. Bloecher, and A. Saadat, "Improving Aquifer Thermal Energy Storage Efficiency."
- [26] W. Sommer, J. Valstar, I. Leusbrock, T. Grotenhuis, and H. Rijnaarts, "Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage," *iAppl. Energy*, vol. 137, pp. 322–337, 01.2015.
- [27] T. Pauschinger, "Solar District Heating with Seasonal Thermal Energy Storage in Germany," *Steinbeis Res. Inst. Sol. Sustain. Therm. Energy Syst.*
- [28] C. Doughty, G. Hellström, C. F. Tsang, and J. Claesson, "A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system," *Water Resour. Res.*, vol. 18, no. 3, pp. 571–587, 1982.
- [29] Godišnji energetske pregled, "Energija u hrvatskoj 2010."
- [30] Godišnji energetske pregled, "Energija u hrvatskoj 2011."
- [31] Godišnji energetske pregled, "Energija u hrvatskoj 2012."
- [32] D. Jelić and S. Plevnik, "TE-TO Karlovac, od ideje do izgradnje...", 2012.
- [33] "Find minimum of constrained nonlinear multivariable function - MATLAB fmincon." [Online]. Dostupno na: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>. [Pristupljeno: 21.12.2015.].
- [34] A. A. Machard, "Renewed degree-day model to estimate," *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 173, p. 178, 1999.
- [35] Aquarea, "Aquarea Capacity Graph for Large Scale Heat Pumps- Full Range." 2013.
- [36] "Gradska toplana d.o.o. | Karlovac | Toplina za svaki dom..." [Online]. Dostupno na: <http://gradska-toplana.hr/hr/>. [Pristupljeno: 07.01.2016].
- [37] "Home - BSP SouthPool Regional Energy Exchange." [Online]. Dostupno na: <http://www.bsp-southpool.com/>. [Pristupljeno: 23.01.2015].
- [38] "HEP ODS d.o.o. - Tarifni modeli." [Online]. Dostupno na: <http://www.hep.hr/ods/kupci/poduzetnistvo.aspx>. [Pristupljeno: 23.12.2015].
- [39] "Meteonorm: Irradiation data for every place on Earth." [Online]. Dostupno na: <http://www.meteonorm.com/>. [Pristupljeno: 07.01.2016].
- [40] Malinovac, "Instalacije zgrada: Proračun gubitaka topline - Zima." FSB, 2013.
- [41] "Godišnji energetske pregled - Energija u Hrvatskoj 2011." Republika Hrvatska - Ministarstvo gospodarstva, 2011.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tablice financijskog i ekonomskog toka novca
- III. MATLAB kod

Tablica 26 Financijski i ekonomski tok novca za Spremnik 1

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	32.777,78 €
Dizalica topline		0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Ukupna amortizacija		49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	32.777,78 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	486.392,68 €
Ukupni bruto prihodi		729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	486.392,68 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	278.611,11 €	755.749,90 €	621.016,46 €	465.045,67 €	75.474,19 €	75.474,19 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		39.822,67 €	33.406,79 €	25.979,61 €	7.428,59 €	7.428,59 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		40.703,43 €	47.119,31 €	54.546,49 €	73.097,51 €	73.097,51 €	0,00 €	0,00 €
Rata		80.526,10 €	80.526,10 €	80.526,10 €	80.526,10 €	80.526,10 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Bruto dobit		726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	484.392,68 €
Porezna osnovica		637.599,69 €	644.015,57 €	651.442,75 €	669.993,77 €	669.993,77 €	677.422,35 €	451.614,90 €
Porez		159.399,92 €	161.003,89 €	162.860,69 €	167.498,44 €	167.498,44 €	169.355,59 €	112.903,73 €
Neto dobit		486.663,00 €	485.059,03 €	483.202,24 €	478.564,48 €	478.564,48 €	557.233,43 €	371.488,96 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	327.777,78 €							
Bruto dobit		726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	484.392,68 €
Neto dobit	-327.777,78 €	567.189,10 €	565.585,13 €	563.728,33 €	559.090,58 €	559.090,58 €	557.233,43 €	371.488,96 €
NPV	1.914.808,89 €	IRR	57,63%					

Tablica 27 Financijski i ekonomski tok novca za Spremnik 2

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	100.925,93 €
Dizalica topline		0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Ukupna amortizacija		151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	100.925,93 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	486.392,68 €
Ukupni bruto prihodi		729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	729.589,02 €	486.392,68 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	857.870,37 €	2.327.026,53 €	1.912.169,34 €	1.431.920,28 €	232.392,29 €	232.392,29 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		122.617,82 €	102.862,71 €	79.993,71 €	22.873,33 €	22.873,33 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		125.329,77 €	145.084,87 €	167.953,87 €	225.074,25 €	225.074,25 €	0,00 €	0,00 €
Rata		247.947,58 €	247.947,58 €	247.947,58 €	247.947,58 €	247.947,58 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Bruto dobit		726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	484.392,68 €
Porezna osnovica		452.582,32 €	472.337,42 €	495.206,42 €	552.326,81 €	552.326,81 €	575.200,13 €	383.466,75 €
Porez		113.145,58 €	118.084,36 €	123.801,61 €	138.081,70 €	138.081,70 €	143.800,03 €	95.866,69 €
Neto dobit		365.495,86 €	360.557,08 €	354.839,83 €	340.559,74 €	340.559,74 €	582.788,99 €	388.525,99 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	1.009.259,26 €							
Bruto dobit		726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	726.589,02 €	484.392,68 €
Neto dobit	-1.009.259,26 €	613.443,44 €	608.504,67 €	602.787,42 €	588.507,32 €	588.507,32 €	582.788,99 €	388.525,99 €
NPV	1.413.495,33 €	IRR	19,47%					

Tablica 28 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 1, Model 1

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	32.777,78 €
Dizalica topline		102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	68.000,00 €
Ukupna amortizacija		151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	100.777,78 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	499.776,28 €
Ukupni bruto prihodi		749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	749.664,42 €	499.776,28 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	856.611,11 €	2.323.610,72 €	1.909.362,49 €	1.429.818,38 €	232.051,17 €	232.051,17 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		122.437,83 €	102.711,72 €	79.876,29 €	22.839,75 €	22.839,75 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		125.145,80 €	144.871,90 €	167.707,34 €	224.743,87 €	224.743,87 €	0,00 €	0,00 €
Rata		247.583,62 €	247.583,62 €	247.583,62 €	247.583,62 €	247.583,62 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	492.476,28 €
Porezna osnovica		465.109,93 €	484.836,04 €	507.671,47 €	564.708,00 €	564.708,00 €	587.547,75 €	391.698,50 €
Porez		116.277,48 €	121.209,01 €	126.917,87 €	141.177,00 €	141.177,00 €	146.886,94 €	97.924,63 €
Neto dobit		374.853,32 €	369.921,79 €	364.212,93 €	349.953,80 €	349.953,80 €	591.827,48 €	394.551,66 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	1.007.777,78 €							
Bruto dobit		738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	738.714,42 €	492.476,28 €
Neto dobit	-1.007.777,78 €	622.436,94 €	617.505,41 €	611.796,55 €	597.537,42 €	597.537,42 €	591.827,48 €	394.551,66 €
NPV	1.450.563,54 €	IRR	19,83%					

Tablica 29 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 1, Model 2

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	32.777,78 €
Dizalica topline		102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	68.000,00 €
Ukupna amortizacija		151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	151.166,67 €	100.777,78 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	333.240,40 €
Ukupni bruto prihodi		499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	499.860,60 €	333.240,40 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	856.611,11 €	2.323.610,72 €	1.909.362,49 €	1.429.818,38 €	232.051,17 €	232.051,17 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		122.437,83 €	102.711,72 €	79.876,29 €	22.839,75 €	22.839,75 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		125.145,80 €	144.871,90 €	167.707,34 €	224.743,87 €	224.743,87 €	0,00 €	0,00 €
Rata		247.583,62 €	247.583,62 €	247.583,62 €	247.583,62 €	247.583,62 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	325.940,40 €
Porezna osnovica		215.306,11 €	235.032,22 €	257.867,65 €	314.904,18 €	314.904,18 €	337.743,93 €	225.162,62 €
Porez		53.826,53 €	58.758,05 €	64.466,91 €	78.726,05 €	78.726,05 €	84.435,98 €	56.290,66 €
Neto dobit		187.500,45 €	182.568,93 €	176.860,07 €	162.600,93 €	162.600,93 €	404.474,62 €	269.649,75 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	1.007.777,78 €							
Bruto dobit		488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	488.910,60 €	325.940,40 €
Neto dobit	-1.007.777,78 €	435.084,07 €	430.152,55 €	424.443,69 €	410.184,56 €	410.184,56 €	404.474,62 €	269.649,75 €
NPV	709.347,41 €	IRR	12,83%					

Tablica 30 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 2, Model 1

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	100.925,93 €
Dizalica topline		102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	68.000,00 €
Ukupna amortizacija		253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	168.925,93 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	708.884,04 €
Ukupni bruto prihodi		1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	1.063.326,06 €	708.884,04 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	1.435.870,37 €	3.894.887,35 €	3.200.515,36 €	2.396.692,99 €	388.969,26 €	388.969,26 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		205.232,97 €	172.167,64 €	133.890,39 €	38.284,49 €	38.284,49 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		209.772,13 €	242.837,47 €	281.114,72 €	376.720,61 €	376.720,61 €	0,00 €	0,00 €
Rata		415.005,11 €	415.005,11 €	415.005,11 €	415.005,11 €	415.005,11 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	701.584,04 €
Porezna osnovica		593.754,20 €	626.819,53 €	665.096,79 €	760.702,68 €	760.702,68 €	798.987,17 €	532.658,11 €
Porez		148.438,55 €	156.704,88 €	166.274,20 €	190.175,67 €	190.175,67 €	199.746,79 €	133.164,53 €
Neto dobit		488.932,40 €	480.666,07 €	471.096,76 €	447.195,28 €	447.195,28 €	852.629,27 €	568.419,51 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	1.689.259,26 €							
Bruto dobit		1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	1.052.376,06 €	701.584,04 €
Neto dobit	-1.689.259,26 €	903.937,51 €	895.671,18 €	886.101,86 €	862.200,39 €	862.200,39 €	852.629,27 €	568.419,51 €
NPV	1.879.944,59 €	IRR	16,80%					

Tablica 31 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 1, Spremnik 2, Model 2

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	100.925,93 €
Dizalica topline		102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	102.000,00 €	68.000,00 €
Ukupna amortizacija		253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	253.388,89 €	168.925,93 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	527.371,20 €
Ukupni bruto prihodi		791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	791.056,80 €	527.371,20 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	1.435.870,37 €	3.894.887,35 €	3.200.515,36 €	2.396.692,99 €	388.969,26 €	388.969,26 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		205.232,97 €	172.167,64 €	133.890,39 €	38.284,49 €	38.284,49 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		209.772,13 €	242.837,47 €	281.114,72 €	376.720,61 €	376.720,61 €	0,00 €	0,00 €
Rata		415.005,11 €	415.005,11 €	415.005,11 €	415.005,11 €	415.005,11 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	520.071,20 €
Porezna osnovica		321.484,94 €	354.550,27 €	392.827,53 €	488.433,42 €	488.433,42 €	526.717,91 €	351.145,27 €
Porez		80.371,23 €	88.637,57 €	98.206,88 €	122.108,35 €	122.108,35 €	131.679,48 €	87.786,32 €
Neto dobit		284.730,46 €	276.464,12 €	266.894,81 €	242.993,34 €	242.993,34 €	648.427,32 €	432.284,88 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	1.689.259,26 €							
Bruto dobit		780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	780.106,80 €	520.071,20 €
Neto dobit	-1.689.259,26 €	699.735,57 €	691.469,23 €	681.899,92 €	657.998,45 €	657.998,45 €	648.427,32 €	432.284,88 €
NPV	1.072.069,16 €	IRR	12,13%					

Tablica 32 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 1, Model 1

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	32.777,78 €
Dizalica topline		459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	306.000,00 €
Ukupna amortizacija		508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	338.777,78 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	946.093,64 €
Ukupni bruto prihodi		1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	1.419.140,46 €	946.093,64 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	2.879.611,11 €	7.811.123,56 €	6.418.573,56 €	4.806.522,86 €	780.070,56 €	780.070,56 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		411.590,88 €	345.278,98 €	268.514,66 €	76.778,83 €	76.778,83 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		420.694,08 €	487.005,99 €	563.770,31 €	755.506,13 €	755.506,13 €	0,00 €	0,00 €
Rata		832.284,97 €	832.284,97 €	832.284,97 €	832.284,97 €	832.284,97 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	938.793,64 €
Porezna osnovica		488.432,91 €	554.744,82 €	631.509,14 €	823.244,96 €	823.244,96 €	900.023,79 €	600.015,86 €
Porez		122.108,23 €	138.686,20 €	157.877,28 €	205.811,24 €	205.811,24 €	225.005,95 €	150.003,97 €
Neto dobit		453.797,27 €	437.219,29 €	418.028,21 €	370.094,26 €	370.094,26 €	1.183.184,51 €	788.789,68 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	3.387.777,78 €							
Bruto dobit		1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	1.408.190,46 €	938.793,64 €
Neto dobit	-3.387.777,78 €	1.286.082,23 €	1.269.504,26 €	1.250.313,18 €	1.202.379,22 €	1.202.379,22 €	1.183.184,51 €	788.789,68 €
NPV	1.686.245,01 €	IRR	10,71%					

Tablica 33 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 1, Model 2

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	49.166,67 €	32.777,78 €
Dizalica topline		459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	306.000,00 €
Ukupna amortizacija		508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	508.166,67 €	338.777,78 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	566.503,72 €
Ukupni bruto prihodi		849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	849.755,58 €	566.503,72 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	2.879.611,11 €	7.811.123,56 €	6.418.573,56 €	4.806.522,86 €	780.070,56 €	780.070,56 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		411.590,88 €	345.278,98 €	268.514,66 €	76.778,83 €	76.778,83 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		420.694,08 €	487.005,99 €	563.770,31 €	755.506,13 €	755.506,13 €	0,00 €	0,00 €
Rata		832.284,97 €	832.284,97 €	832.284,97 €	832.284,97 €	832.284,97 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	559.203,72 €
Porezna osnovica		-80.951,97 €	-14.640,06 €	62.124,26 €	253.860,08 €	253.860,08 €	330.638,91 €	220.425,94 €
Porez		0,00 €	775,39 €	15.531,06 €	63.465,02 €	63.465,02 €	82.659,73 €	55.106,49 €
Neto dobit		6.520,62 €	5.745,22 €	-9.010,45 €	-56.944,40 €	-56.944,40 €	756.145,85 €	504.097,24 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	3.387.777,78 €							
Bruto dobit		838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	838.805,58 €	559.203,72 €
Neto dobit	-3.387.777,78 €	838.805,58 €	838.030,19 €	823.274,52 €	775.340,56 €	775.340,56 €	756.145,85 €	504.097,24 €
NPV	-24.298,69 €	IRR	4,91%					

Tablica 34 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 2, Model 1

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	100.925,93 €
Dizalica topline		459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	306.000,00 €
Ukupna amortizacija		610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	406.925,93 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.077.836,38 €
Ukupni bruto prihodi		1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.616.754,57 €	1.077.836,38 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	3.458.870,37 €	9.382.400,20 €	7.709.726,44 €	5.773.397,47 €	936.988,66 €	936.988,66 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		494.386,03 €	414.734,90 €	322.528,76 €	92.223,58 €	92.223,58 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		505.320,42 €	584.971,55 €	677.177,69 €	907.482,88 €	907.482,88 €	0,00 €	0,00 €
Rata		999.706,45 €	999.706,45 €	999.706,45 €	999.706,45 €	999.706,45 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.070.536,38 €
Porezna osnovica		501.029,65 €	580.680,78 €	672.886,92 €	903.192,10 €	903.192,10 €	995.415,68 €	663.610,45 €
Porez		125.257,41 €	145.170,19 €	168.221,73 €	225.798,02 €	225.798,02 €	248.853,92 €	165.902,61 €
Neto dobit		480.840,70 €	460.927,92 €	437.876,38 €	380.300,09 €	380.300,09 €	1.356.950,65 €	904.633,76 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	4.069.259,26 €							
Bruto dobit		1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.605.804,57 €	1.070.536,38 €
Neto dobit	-4.069.259,26 €	1.480.547,15 €	1.460.634,37 €	1.437.582,84 €	1.380.006,54 €	1.380.006,54 €	1.356.950,65 €	904.633,76 €
NPV	1.771.290,62 €	IRR	10,05%					

Tablica 35 Financijski i ekonomski tok novca za Dizalica topline 2, Spremnik 2, Model 2

Financijski tok novca								
Godina	0	3	6	9	12	15	18	20
<u>Amortizacija</u>								
Spremnik		151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	151.388,89 €	100.925,93 €
Dizalica topline		459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	459.000,00 €	306.000,00 €
Ukupna amortizacija		610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	610.388,89 €	406.925,93 €
<u>Prihodi</u>								
Bruto ušteda u gorivu		867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	578.297,84 €
Ukupni bruto prihodi		867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	867.446,76 €	578.297,84 €
<u>Rashodi</u>								
<u>Kredit</u>								
Pozajmica	3.458.870,37 €	9.382.400,20 €	7.709.726,44 €	5.773.397,47 €	936.988,66 €	936.988,66 €	0,00 €	0,00 €
Kamata		494.386,03 €	414.734,90 €	322.528,76 €	92.223,58 €	92.223,58 €	0,00 €	0,00 €
Glavnica		505.320,42 €	584.971,55 €	677.177,69 €	907.482,88 €	907.482,88 €	0,00 €	0,00 €
Rata		999.706,45 €	999.706,45 €	999.706,45 €	999.706,45 €	999.706,45 €	0,00 €	0,00 €
<u>Održavanje</u>								
Dizalica topline		7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	7.950,00 €	5.300,00 €
Spremnik		3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	2.000,00 €
Ukupno održavanje		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
<u>Neto dobit</u>								
Ukupni rashodi		10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	10.950,00 €	7.300,00 €
Bruto dobit		856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	570.997,84 €
Porezna osnovica		-248.278,16 €	-168.627,03 €	-76.420,89 €	153.884,30 €	153.884,30 €	246.107,87 €	164.071,91 €
Porez		0,00 €	0,00 €	0,00 €	38.471,07 €	38.471,07 €	61.526,97 €	41.017,98 €
Neto dobit		-143.209,69 €	-143.209,69 €	-143.209,69 €	-181.680,76 €	-181.680,76 €	794.969,79 €	529.979,86 €
Ekonomski tok novca								
Ukupna investicija	4.069.259,26 €							
Bruto dobit		856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	570.997,84 €
Neto dobit	-4.069.259,26 €	856.496,76 €	856.496,76 €	856.496,76 €	818.025,69 €	818.025,69 €	794.969,79 €	529.979,86 €
NPV	-550.408,78 €	IRR	3,23%					

MATLAB KOD

Storage_1Boj_1HP.m

```
%% Priprema matlab sučelja
clc
clear all
close all

filename = 'rezultati_1.mat'; % Sve varijable se ovdje spremaju

%% Učitavanje podataka
N_tren = 48;
N_res = 1;
im_COP = importdata('./distributions/COP_1.txt');
im_p_ele = importdata('./distributions/Struja_1.txt');
im_chp = importdata('./distributions/CHP_1.txt');
im_d_heat = importdata('./distributions/DEM_1.txt');

Price_gorivo = 37;
COP = zeros(N_tren/N_res,1);
Price_ele = zeros(N_tren/N_res,1);
CHP = zeros(N_tren/N_res,1);
DEM = zeros(N_tren/N_res,1);
for i=1:N_tren/N_res
    t1 = (i-1)*N_res + 1;
    t2 = (i-1)*N_res + N_res;
    COP(i) = mean(im_COP (t1:t2));
    Price_ele(i) = mean(im_p_ele (t1:t2));
    CHP(i) = mean(im_chp (t1:t2));
    DEM(i) = mean(im_d_heat (t1:t2));
end

N = N_tren/N_res; % size of all working arrays

%% Inicijalna rješenja X0
x0=[8*ones(size(DEM));5*ones(size(DEM))];

%% Ručno unesene varijable
% Koeficijenti sigmoidne funkcije
k11 = 0.9471;
k12 = 8.795;
k13 = 32.96;
k14 = 5.075;
k15 = 0.001;

N=length(DEM); % broj vremenskih trenutaka

%% Definiranje varijabli
Pmax1 = 50; % maksimalna snaga toplane
FiMaxUlaz = 70; % maksimalan energetska tok na ulazu u spremnik
Smax = 500; % veličina spremnika
Smin = 0.15; % koliko spremnik mora biti minimalno napunjen izraženo u %
Spoc = 0.50; % koliko je spremnik napunjen na početku i kraju
stor0 = Smax*Spoc; % inicijalna veličina spremnika
Pmax3 = 4.5; % Snaga dizalice topline
```



```

%% Definiranje ograničenja u datoteci DefineConstraints.m
DefineConstraints_2Boj_1HP;

%% Proračun funkcije cilja
% Korištenje symbolic zapisa za lakšu manipulaciju velikog broja varijabli
X=sym('x',[2*N,1]);
D=sym('D',[N,1]);
H=sym('C',[N,1]);
s0=sym('s0');
K11=sym('k11');
K12=sym('k12');
K13=sym('k13');
K14=sym('k14');
K15=sym('k15');

TotBoj=X(1:N)+X(N+1:end);
% Spremnik u početnom trenutku je već napunjen za stor0, svaki slijedeći
% ovisi o onima iz ranijih trenutaka
S=cell(N,1);
S{1}=s0+H(1)+TotBoj(1)-D(1);

for ii=2:N
    S{ii}=S{ii-1}+H(ii)+TotBoj(ii)-D(ii);
end

% Symbolic funkcija za etu
etal=(K11./(1+K12*exp(K13-K14*X(1:N)))+K15);

% Revenue ili zarada
R=Price_gorivo*X(1:N)./etal+Price_ele.*X(N+1:end)./COP;

% Ukupna zarada kroz sve vremenske intervale
totR=sum(R);

% Zamjena symobilc varijabli sa stvarnim brojevima
totR=subs(totR,[D;H;s0;K11;K12;K13;K14;K15],[DEM;CHP;stor0;k11;k12;k13;k14;k15]);

% Stvaranje matlab funckije u kojoj je nepoznanica X u objFcn.m
matlabFunction(totR,'vars',{X},'file','objFcn');

%% Optimizacija s gradijentom
gradObj=gradient(totR,X);
matlabFunction(gradObj,'vars',{X},'file','grad');
ValAndGrad = @(x) deal(objFcn(x),grad(x));

% Opcije za solver
options=optimset('MaxFunEvals',Inf,'MaxIter',4000,'TolCon',1e-6,'TolFun',1e-6,'TolX',1e-6,'Algorithm','interior-point','Display','iter','InitBarrierParam',1e20,'GradObj','on','UseParallel','always');

% Pokretanje solvera gdje tic i toc mjere dužinu trajanja optimizacije
tic
[x2,fval2,exitflag,output,lambda]=fmincon(ValAndGrad,x0,A,b,Aeq,beq,LB,UB,[],options)
toc

```

```

%% Popunjavanje vrijednosti u spremniku

Boj1=x2(1:N);
HP=x2(N+1:end);

for i= 1:N
    if i==1
        s_heat(i)=stor0+CHP(i)+Boj1(i)+HP(i)-DEM(i);
    else
        s_heat(i)=s_heat(i-1)+CHP(i)+Boj1(i)+HP(i)-DEM(i);
    end
end

eta11=(k11./(1+k12*exp(k13-k14*Boj1(1:N)))+k15);
s_heat=[stor0, s_heat];
trosak_fuel=Price_gorivo.*Boj1./eta11+Price_ele.*HP./COP;
kum_trosak_fuel=cumsum(trosak_fuel);

%% Spremanje rezultata
save (filename)

```

Define_constraints.m

```

%% Gornja i donja granica
LB=zeros(2*N,1);
UB=[Pmax1*ones(N,1); Pmax3*ones(N,1)];

%% Nejednakosti:
% Ograničenje na ukupni ulaz u spremnik, Zbroj CHP i Kotla mora bit manji
ili jednak Fimaxulaz-chp

ot=ones(N,1);
b=ot*FiMaxUlaz-CHP;
A=spdiags([ot ot],[0 N],N,2*N);

% Ograničenje na minimalnu razliku između snage u dva intervala
A2=spdiags([ot -ot],[0 -1],N,2*N);
b21=Pmax1*Start1*ot;
b22=Pmax1*Start1*ot;

A2(1,:)=[];
b21(1,:)=[];
b22(1,:)=[];

A=[A;A2;-A2];
b=[b;b21;b22];

%% Ograničenje na spremnik:
% Spremnik na početku + Suma izlaza iz spremnika - Suma ulaza u spremnik=0
% U intervalu od Smin*Smax <= Spremnik <= Smax
% Matrica S izgleda ovako:
%   | 1 0 0 |
% S =| 1 1 0 |
%   | 1 1 1 |
c=stor0-cumsum(DEM)+cumsum(CHP);
b=[b; Smax-c;-Smax*Smin+c];

```

```
s=sparse(tril(ones(N)) );  
s=[s s];  
A=[A;s;-s];
```

```
%% Jednakosti:
```

```
% % Odnosi se na spremnik na početku mora bit jednak spremnik na kraju
```

```
% % Suma svih izlaza mora bit jednaka sumi svih ulaza
```

```
Aeq=ones(1,2*N);
```

```
beq=sum(DEM)-sum(CHP);
```